



Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía

ZONIFICACIÓN DEL ESPACIO POR AGRUPACIÓN DE UNIDADES SUPERFICIALES. APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE DE SISTEMAS EXTENSIVOS DEL TIPO CEREAL-OVINO.

Autora: Pilar Moreno Regidor
(Ingeniera en Geodesia y Cartografía)

Director:
Dr. Jesús García López de Lacalle
(Doctor en Ciencias Matemáticas)

Año 2012





POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el
día.....de.....de 20....

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20 ...
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES





AGRADECIMIENTOS

Recorrer el camino de escribir esta tesis ha sido un trabajo lleno de dificultades y algunas satisfacciones, tales como el apoyo de mis compañeros y el ánimo de los que pacientemente me han escuchado, especialmente mi compañero Francisco J. García Lázaro. Y, por supuesto, mi agradecimiento a Jesús García por aceptar ser mi tutor y hacer posible este proyecto.

Aunque finalmente esta tesis no será más que “... palabras, palabras desplazadas y mutiladas, palabras de otros, como la pobre limosna que nos dejan las horas y los siglos (J. L. Borges)”, gracias a todos, amigos y compañeros, por la confianza que siempre me habéis mostrado y por vuestra ayuda.

A mis padres, por su amor incondicional y sincero y por el tiempo que no he estado a su lado.

A la memoria de Paco, quién ya nunca podrá leer estas páginas, aunque su ausencia, convertida por el tiempo en costumbre añadida, me ha acompañado en todo momento.

*“Es una invitación para el camino
todo lo que separa dos distancias”*
(Carlos Marzal)



RESUMEN

Los procesos de diseño de zonas o diseño del territorio implican la partición de un espacio geográfico, organizado en un conjunto de unidades de área, en diferentes regiones o zonas según un conjunto específico de criterios que varían en función del campo de aplicación. En la mayoría de los casos, el objetivo fundamental consiste en crear zonas de tamaño aproximadamente igual respecto a uno o varios atributos de medida -de carácter cuantitativo- (zonas con igual número de habitantes, igual promedio de ventas...). Sin embargo, están apareciendo nuevas aplicaciones, algunas en el contexto de las políticas de desarrollo sostenible, cuya finalidad es la definición de regiones con un tamaño predeterminado, no necesariamente similar. Además, en estos casos las zonas han de formarse en torno a un conjunto específico de posiciones, semillas o generadores. Este tipo de particiones no han sido lo suficientemente investigadas, de manera que no se conocen modelos de solución para la delimitación automática de las zonas.

En esta tesis se ha diseñado un nuevo método basado en una versión discreta del diagrama de Voronoi con peso aditivo adaptativo (DVPA), que permite la partición de un espacio bidimensional en zonas de un tamaño específico, considerando tanto la posición como el peso de cada uno de los generadores. El método consiste en resolver repetidamente un tradicional diagrama de Voronoi con peso aditivo, de forma que los pesos de cada generador se actualizan en cada iteración. En el proceso de cálculo de distancias se usa una métrica basada en el camino más corto, lo que garantiza que la partición obtenida esté formada por un conjunto de zonas conexas.

La heurística diseñada se integra en una aplicación prototipo, desarrollada en un entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica), que permite el trazado automático de zonas según los criterios anteriormente expuestos.

Para analizar la viabilidad del método se ha utilizado como caso de estudio la gestión de los recursos pastorales para la ganadería extensiva en tres municipios de Castilla-La Mancha. Las pruebas realizadas ponen de manifiesto que la heurística diseñada, adaptada a los criterios que se plantean en el contexto de la gestión de sistemas extensivos agropecuarios, es válida para resolver este tipo de problemas de partición.

El método propuesto se caracteriza por su eficacia en el tratamiento de un gran número de unidades superficiales en formato vectorial, generando soluciones que convergen con relativa rapidez y verifican los criterios establecidos.



En el caso estudiado, aunque la posición prefijada de los generadores reduce considerablemente la complejidad del problema, existen algunas configuraciones espaciales de estos elementos para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria, poniéndose de manifiesto una de las limitaciones de este modelo.

Tal y como se ha podido comprobar, la localización de los generadores puede tener un considerable impacto en la zonificación resultante, por lo que, de acuerdo con Kalcsics et al. (2005), una selección “inadecuada” difícilmente puede generar regiones válidas que verifiquen los criterios establecidos.

Palabras clave: “diseño de zonas”, “zonificación”, “regionalización”, “diseño del territorio”, “districting”, “partición”, “asignación espacial de unidades”, “diagramas de Voronoi”, “problemas de segmentación”, “teselaciones espaciales”.



ABSTRACT

Territory or zone design processes entail partitioning a geographic space, organized as a set of basic areal units, into different regions or zones according to a specific set of criteria that are dependent on the application context. In most cases the aim is to create zones that have approximately equal sizes with respect to one or several measure attributes (zones with equal numbers of inhabitants, same average sales, etc). However, some of the new applications that have emerged, particularly in the context of sustainable development policies, are aimed at defining zones of a predetermined, though not necessarily similar, size. In addition, the zones should be built around a given set of positions, seeds or generators. This type of partitioning has not been sufficiently researched; therefore there are no known approaches for automated zone delimitation.

This thesis proposes a new method based on a discrete version of the Adaptive Additively Weighted Voronoi Diagram (AAWVD) that makes it possible to partition a 2D space into zones of specific sizes, taking both the position and the weight of each (seed) generator into account. The method consists of repeatedly solving a traditional additively weighted Voronoi diagram, so that the weights of each generator are updated at every iteration. The partition's zones are geographically connected using a metric based on the shortest path.

The proposed heuristic has been included in an application, developed in a GIS environment that allows the automated zone delimitation according to the mentioned criteria.

The management of the extensive farming system of three municipalities of Castilla-La Mancha (Spain) has been used as study case to analyze the viability of the method. The tests carried out have established that the proposed method, adapted to the criteria of this application field, is valid for solving this type of partition problem. The applied algorithm is capable of handling a high number of vector areal units, generating solutions that converge in a reasonable CPU time and comply with the imposed constraints. Although the complexity of this problem is greatly reduced when the generator's positions are fixed, in many cases, these positions impose a spatial configuration that the algorithm proposed is unable to solve, thus revealing one of the limitations of this method. It has been shown that the location of the generators has a considerable impact on the final solution, so that, as Kalcsics et al. (2005) observed, an “inadequate” selection can hardly generate valid zones that comply with the established criteria.

Keywords: “zone design”, “zoning”, “regionalization”, “territory design”, “districting”, “partitioning”, “spatial unit allocation”, “Voronoi diagram”, “segmentation problems”, “spatial tessellations”.





INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Planteamiento del problema	3
1.3	Hipótesis, objetivos y aportaciones de la investigación	5
1.4	Metodología utilizada y recursos disponibles	7
1.5	Estructura de la tesis	8
1.6	Resumen del capítulo	9
2	ESTADO DEL ARTE	11
2.1	Introducción	11
2.1.1	El diseño de zonas: un problema de partición espacial	11
2.1.2	Campos de aplicación del diseño de zonas	14
2.2	Formalización matemática de los problemas de zonificación: revisión bibliográfica	24
2.2.1	Complejidad del problema	24
2.2.1.1	Técnicas heurísticas de optimización	28
2.2.2	Modelizaciones del problema	34
2.2.2.1	Modelos de programación matemática	37
2.2.2.2	Modelos de partición de grafos	41
2.2.2.3	Modelos de análisis cluster	44
2.2.2.4	Otros modelos: Diagramas de Voronoi	47
2.2.2.5	Clasificación de los modelos	52
2.3	Aplicaciones para la automatización de problemas de diseño de zonas	64
2.4	Resumen del capítulo	66
3	EL MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO	68
3.1	Introducción	68
3.2	El diseño de zonas en sistemas extensivos de tipo cereal-ovino	71
3.3	Diagramas de Voronoi	79
3.3.1	Diagramas de Voronoi con Peso (DVP)	81
3.4	Presentación del nuevo modelo de solución	87
3.4.1	Restricciones del algoritmo basado en un DVPA	95
3.4.2	Ajuste del modelo: estimación del parámetro de control L	103
3.4.3	Implementación del algoritmo	114
3.4.4	Fortalezas y debilidades del modelo	120
3.4.5	Otros modelos de solución	135
3.5	Resumen del capítulo	145



4	APLICACIÓN DEL MODELO AL CASO DE ESTUDIO	148
4.1	Área de estudio.....	148
4.2	Elaboración de un SIG de recursos agrarios del área de estudio	152
4.2.1	Diseño conceptual	154
4.2.2	Fuentes de datos	161
4.2.3	Integración y edición geométrica de datos.....	169
4.2.4	Edición temática de datos.....	181
4.2.5	Edición estructural. Cálculo de FAE.....	191
4.2.6	Preproceso de datos: división de la red viaria.....	195
4.3	Resultados: generación de polígonos de pasto.....	201
4.3.1	Discusión de resultados.....	220
4.4	Resumen del capítulo	230
5	CONCLUSIONES	233
5.1	Futuras líneas de investigación	236
5.2	Resumen del capítulo	241
6	BIBLIOGRAFIA.....	244
7	APÉNDICES.....	254
7.1	Apéndice 1: Índices de configuración y composición del paisaje	254
7.2	Apéndice 2: Manual de la aplicación	263
7.2.1	Entrada de datos	263
7.2.2	Proceso de datos.....	266
7.2.2.1	Ventana de gráficos.....	267
7.2.3	Presentación de resultados	271
7.3	Apéndice 3: Glosario de abreviaturas	277



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Parcelas catastrales de tres municipios de Castilla-La Mancha. (b) Polígonos definidos en dichos municipios por las correspondientes Comisiones Locales de Pasto.....	4
Figura 2. Fases y componentes de un proceso de diseño de zonas.....	34
Figura 3. Un grafo y su correspondiente árbol generador mínimo (adaptación de Assunção R. 2006).....	43
Figura 4. (1) Polígonos semilla iniciales. (2) Selección de unidades contiguas candidatas. (3) Fusión de las unidades más similares según reglas predefinidas. (4) Siguierte iteración en el proceso de selección.....	45
Figura 5. Diagrama de Voronoi estándar.....	47
Figura 6. Diagrama de Voronoi con peso multiplicativo.....	48
Figura 7. Ilustración gráfica del uso de diagramas de Voronoi en la construcción de zonas de código postal (adaptación de Martin 1998).....	49
Figura 8. Ilustración gráfica del proceso de “dicotomías sucesivas” (Kalcics et al. 2009).....	50
Figura 9. Partición de un conjunto de unidades básicas y su correspondiente árbol binario (Kalcics et al. 2009).....	50
Figura 11. Ilustración gráfica, según el algoritmo implementado por Eagleson, de las fases de construcción de cada una de las zonas de un territorio. La solución final integra todas las zonas que se han ido construyendo por separado.....	57
Figura 12. Ilustración gráfica, según el algoritmo de Tiede y Strobl, de la construcción simultánea de todas las zonas en torno a sus semillas.....	58
Figura 13. Ilustración gráfica del proceso iterativo de modificaciones a partir de una zonificación inicial.....	59
Figura 14. Ilustración gráfica del algoritmo AZP (adaptación de Martin 2000).....	60
Figura 14. Ejemplo de parcelas con aprovechamiento forrajero pero inaccesibles al ganado por su ubicación.....	75
Figura 15. Visualización de las parcelas asignadas a los polígonos de pasto. Las parcelas no accesibles al ganado se representan con un tono de color menos intenso que las que sí lo son.....	78
Figura 16. Diagrama de Voronoi estándar.....	79
Figura 17. Ejemplos de Diagramas de Voronoi Generalizados (planos): (a) De orden 2 -cada generador incluye 2 puntos-. (b) De sitio -la geometría del generador puede ser de varios tipos-.....	80
Figura 18. Ejemplo de Diagrama de Voronoi Generalizado en métrica (plano).....	80
Figura 19. (a) Diagrama de Voronoi estándar. (b) Diagrama con generadores ponderados (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5). Al aplicar el valor del peso w a los generadores, excepto a p_1 , se forma el diagrama mostrado en cada caso.....	82
Figura 20. Diagrama de Voronoi con Peso Multiplicativo generado por 7 puntos cuyos pesos figuran entre paréntesis.....	83
Figura 21. Ejemplo de Diagrama de Voronoi con Peso Aditivo.....	84
Figura 22. Ejemplo de Diagrama de Voronoi de Potencia para círculos en el plano.....	85
Figura 23. Ejemplo de aplicación de los diagrama de potencia en el diseño de zonas con obstáculos (según Novaes et al. 2009).....	86
Figura 24. Ejemplos de un recubrimiento exhaustivo y excluyente.....	88
Figura 25. Geometrias de las unidades básicas y puntos representativos de cada una de ellas.....	88
Figura 26. (a) Áreas metropolitanas estadísticas. (b) Centroides de estas áreas. (c) Regiones de influencia de las áreas metropolitanas obtenidas a partir de un DVPM (Mu y Wang 2006).....	89
Figura 27. Cálculo de centroides como: (a) puntos interiores o (b) puntos exteriores a las áreas. En (b) se marca con una flecha la posición interior alternativa del centroide.....	90
Figura 28. Ejemplo de cálculo de centroides con el programa ArcGis. En color verde se visualizan los que corresponden a los centros de gravedad, y en color rojo los obtenidos al forzar su posición al interior del área.....	90
Figura 29. Ejemplo de cálculo de centroides con los programas ArcGis (color rojo) y GeoMedia (color azul).....	91
Figura 30. (a) Uso de centroides, en sustitución de las unidades de área, para calcular el diagrama de Voronoi plano estándar-medida de distancias entre centroides según métrica euclídea-. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas.....	91
Figura 31. (a) Ejemplo igual al de la figura 30, a excepción de la posición del centroide de la parcela resaltada en color amarillo. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas a los centroides.....	92
Figura 32. (a) Uso de centroides, en sustitución de áreas, para calcular el diagrama de Voronoi plano estándar-medida de distancias entre centroides según el camino más corto en su grafo de adyacencia-. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas a los centroides.....	92
Figura 33. (a) Ejemplo igual al de la figura 32, a excepción de la posición del centroide de la parcela resaltada en color amarillo. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas a los centroides.....	92
Figura 34. Anomalías en la definición de zonas por el uso de centroides en el cálculo del diagrama de Voronoi.....	94



Figura 35. Ejemplo de conjuntos convexos y no convexos.....	95
Figura 36. Ejemplo de distribución espacial de generadores en el conjunto de puntos que representan el territorio (recinto cerrado y limitado).....	96
Figura 37. Ejemplo de cálculo de distancias $dsp(,)$ entre dos puntos.....	98
Figura 38. (a) Regionalización del municipio El Romeral, usando DVPAA con una función $dw(,)$ que emplea distancias euclídeas. (b) Distancia euclídea entre p_i y c_i -color azul- frente a la distancia $dsp(c_i, p_i)$ -color negro-.....	98
Figura 39. Criterio usado para determinar la adyacencia entre unidades básicas.....	99
Figura 40. Ejemplo (a): Partición de 10000 unidades en 3 regiones usando diferentes valores del parámetro L.....	104
Figura 41. Ejemplo (b): Partición de 17539 unidades en 6 regiones usando diferentes valores del parámetro L.....	104
Figura 42. Variación del número de iteraciones en una zonificación usando diferentes valores de L.....	105
Figura 43. Particiones espaciales de 4 y 5 regiones (ejemplos 1 y 2 respectivamente), donde el uso de ciertas constantes para el parámetro L hace inestable el proceso de cálculo, generando una solución no satisfactoria.....	106
Figura 44. Variación de los errores relativos de las regiones del ejemplo 1 en sucesivas iteraciones ($L = 80000$).....	107
Figura 45. Variación de los errores relativos de las regiones del ejemplo 2 en sucesivas iteraciones ($L = 10000$).....	107
Figura 46. Errores finales relativos de las regiones del ejemplo 1, para diferentes valores del parámetro L.....	107
Figura 47. Variación de los errores relativos obtenidos en una zonificación usando diferentes valores de L.....	108
Figura 48. N° máximo y mínimo de iteraciones para valores del parámetro L que generan una zonificación válida.....	109
Figura 49. Comparación entre los resultados generados con valores constantes de L frente al uso de un parámetro adaptativo.....	111
Figura 50. Variación del parámetro L y de los errores relativos de las regiones durante el proceso de cálculo (I).....	112
Figura 51. Variación del parámetro L y de los errores relativos de las regiones durante el proceso de cálculo (II).....	113
Figura 52. Visualización de las unidades asignadas a las zonas. Las unidades no accesibles se representan con un tono de color menos intenso. Tabla adjunta con los datos de porosidad de cada zona.....	118
Figura 53. (a) Visualización de las unidades asignadas a las zonas. (b) Visualización de la geometría de las zonas.....	118
Figura 54. Fases del algoritmo correspondiente al modelo de solución.....	119
Figura 55. Tiempos de ejecución del algoritmo Dijkstra en particiones de un número predeterminado de regiones, considerando conjuntos de datos de varios tamaños. Junto a la representación de los datos aparecen una función de ajuste potencial -color negro- y su respectivo coeficiente de determinación R^2	123
Figura 56. Tiempos de ejecución del algoritmo Voronoi en particiones de un número predeterminado de regiones, considerando conjuntos de datos de varios tamaños. Junto a la representación de los datos aparecen una función de ajuste potencial -color negro- y su respectivo coeficiente de determinación R^2	123
Figura 57. Particiones espaciales de diferente número de regiones, considerando conjuntos de datos de varios tamaños.....	124
Figura 58. Tiempos de ejecución del algoritmo Dijkstra, considerando conjuntos de datos de varios tamaños en particiones de diferente número de regiones. Junto a la representación de los datos aparecen: dos funciones de ajuste (polinómica de orden 2 -color negro- y lineal -color verde-) y sus respectivos coeficientes de determinación R^2	126
Figura 59. Tiempos de ejecución del diagrama de Voronoi (DVPAA), considerando conjuntos de datos de varios tamaños en particiones de diferente número de regiones. Junto a la representación de los datos aparecen: dos funciones de ajuste (polinómica de orden 2 -color negro- y lineal -color verde-) y sus respectivos coeficientes de determinación R^2	127
Figura 60. Variación de los errores relativos de las regiones durante el proceso de cálculo para diferentes L.....	128
Figura 61. Variación de los errores relativos de las zonas en el proceso de cálculo, usando: (a) L adaptativo, (b) $L=80000$	129
Figura 62. Zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria (I).....	130
Figura 63. Zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria (II).....	131
Figura 64. Zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria (III).....	132
Figura 65. Ejemplo (1) de soluciones de menor error en zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria.....	133
Figura 66. Ejemplo (2) de soluciones de menor error en zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria.....	134
Figura 67. Ejemplo de una zonificación obtenida con el modelo alternativo de solución n° 2 en diferentes iteraciones del bucle de cálculo ($C=0.3$, $\varepsilon=0.1$).....	142
Figura 68. Ejemplo de zonificaciones, obtenidas con el modelo alternativo de solución n° 2, donde algunas regiones son un conjunto vacío ($\varepsilon=0.1$).....	144



Figura 69. Localización del área de estudio: (a) Comunidad de Castilla-La Mancha. (b) Provincia de Toledo.	148
Figura 70. Componentes de un SIG.	152
Figura 71. Fases en la elaboración de un proyecto de SIG.	153
Figura 72. Elementos para especificar la posición espacial.	156
Figura 73. Diagrama E/R (versiones inicial y final) del modelo de datos del proyecto de SIG.	158
Figura 74. (a) Parcelario de rústica {fuente: DGC}. (b) Polígonos de pasto del área de estudio en el año 2004 {Fuente: proyecto LACOPE}.	163
Figura 75. Información del Visor SIGPAC: Visualización de (a) parcelas y (b) recintos agrícolas con sus atributos.	166
Figura 76. Distribución de las hojas del MTN (a) y de las ortofotos del SIGPAC (b) del área de estudio.	166
Figura 77. Fuente de datos auxiliar nº 2: Oficina Virtual del Catastro.	168
Figura 78. Fusión de conjuntos de datos en procesos de Armonización Horizontal (a) y Vertical (b).	170
Figura 79. Ejemplo de huecos y solapes entre parcelas de municipios adyacentes.	170
Figura 80. Ejemplo de solapes entre parcelas de dos municipios.	171
Figura 81. Ejemplos de superposición entre parcelas colindantes de diferentes municipios.	171
Figura 82. (A) Ejemplo de parcelas superpuestas en los municipios de El Romeral y Lillo. (B) Resultado de la edición automática al eliminar las parcelas sin datos en uno de los municipios.	172
Figura 83. Resultado de la edición de la figura anterior, visualizando los atributos asociados a la parcela no eliminada.	172
Figura 84. Ejemplo de parcelas superpuestas con diferentes datos asociados en dos municipios. Comprobación de sus geometrías sobre ortofoto de la zona.	173
Figura 85. Ejemplo de parcelas superpuestas en dos municipios sin datos asociados en ninguno de ellos.	173
Figura 86. Ejemplo de huecos (polígonos en color blanco) entre dos municipios.	174
Figura 87. Detección y corrección de huecos y solapes entre dos municipios.	174
Figura 88. (a) Ejemplo de huecos interiores en el parcelario catastral. (b) Resultado de la edición geométrica.	175
Figura 89. (a) Parcelas antes de la edición. (b) Parcelas después de la edición.	175
Figura 90. (a) Ejemplo de parcelas duplicadas. (b) Ejemplo de polígonos ficticios generados en procesos de edición automática de otros errores.	176
Figura 91. Caracterización de unidades del tipo vía con otro valor de uso catastral: (a) “Sin Datos”, (b) “Improductivo”.	183
Figura 92. Unidades catastrales diferentes (zona urbana, parcela agrícola y vías) caracterizadas como parcelas de descuento de uso improductivo.	183
Figura 93. Uso de los mismos valores de identificación. Caso (a): Una misma unidad catastral, dividida por un camino, ha generado dos geometrías. Caso (b): Error en la identificación de dos unidades completamente diferentes.	184
Figura 94. Campos de relación entre las bases de datos del SIGPAC y del Catastro.	186
Figura 96. Ejemplo de unión relacional entre las bases de datos del SIGPAC y del Catastro.	187
Figura 97. Unidades agrícolas del SICPAC: parcelas (líneas en color rojo) y recintos en su interior de uso diferente (líneas en color violeta).	188
Figura 98. (a) Geometría de subparcelas antes de la fusión. (b) Geometría de parcelas tras la fusión.	189
Figura 99. Representación gráfica de las geometrías de los recintos del SIGPAC, (a) antes y (b) después del proceso de eliminación de los recintos de menor dimensión declarados en cada parcela.	189
Figura 100. Visualización de las parcelas accesibles [FAE \geq 0] (color verde) y no accesibles al ganado [FAE $<$ 0] (color rojo) en los municipios de El Romeral (a), Lillo (b) y Corral de Almaguer (c).	193
Figura 101. Ejemplos de la geometría característica de las parcelas del viario -(a) en color verde, (b) en color azul-.	195
Figura 102. Ejemplos de polígonos de pasto formados a partir de las geometrías originales del parcelario de catastro (I).	195
Figura 103. Ejemplo de polígonos de pasto formados a partir de las geometrías originales del parcelario de catastro (II).	196
Figura 104. Parcelario catastral: (a) antes y (b) después de la división del viario.	196
Figura 105. Ejemplos del trazado de la línea eje del viario.	197
Figura 106. Ejemplos de un eje del viario (a) antes y (b) después de la edición geométrica.	197
Figura 107. Ejemplos de nodos de intersección entre parcelas y viario.	198
Figura 108. Ejemplos del trazado de líneas perpendiculares a los ejes del viario.	198
Figura 109. Ejemplos de las geometrías de área correspondientes a la división del viario.	198
Figura 110. Antes (a) y después (b) del proceso de edición de las geometrías obtenidas por división del viario.	199
Figura 111. Sustitución de la geometría original de las parcelas del viario por la obtenida en el proceso de división.	200
Figura 112. Parcelario del área de estudio obtenido tras el proceso de división del viario.	200
Figura 113. Ejemplo de parcelas de pasto “no accesibles” (parcelas resaltadas con borde en color rojo).	203



Figura 114. Ejemplo de distribución de parcelas “no transitables” en el municipio de Lillo.	203
Figura 115. Ejemplos de distribución de parcelas “no transitables” en diferentes polígonos de pasto.	204
Figura 116. Municipio de Lillo. Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($ e_i \leq 0.1$).	205
Figura 117. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos ($ e_i \leq 0.1$).	206
Figura 118. Municipio de Corral de Almaguer. (a) Resultado de una partición considerando 4 apriscos ($ e_i \leq 0.1$).	206
Figura 119. (a.1) Municipio de Lillo (visualización de parcelas transitables con relleno de color). (a.2) Resultado de una partición espacial considerando 3 apriscos ($ e_i \leq 0.1$). (a.3) Detalle de las parcelas asignadas a los polígonos.	208
Figura 120. Municipio de Lillo. (b) Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos ($ e_i \leq 0.1$).	208
Figura 121. (a) Municipio de El Romeral (visualización de parcelas transitables con relleno de color). (b) Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos ($ e_i \leq 0.1$).	209
Figura 122. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($ e_i \leq 0.1$).	209
Figura 123. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos y un umbral de tolerancia para el error relativo de: (a) $ e_i \leq 0.10$ y (b) $ e_i \leq 0.05$	210
Figura 124. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 5 apriscos y un umbral de tolerancia para el error relativo de: (a) $ e_i \leq 0.1$ y (b) $ e_i \leq 0.05$. (c) Ampliación de los bordes entre polígonos de pasto (todas las regiones son conexas).	211
Figura 125. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($ e_i \leq 0.1$).	212
Figura 126. Municipio de Corral de Almaguer. (a) Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($ e_i \leq 0.05$). (b) Ampliación del borde entre dos polígonos de pasto (todas las regiones son conexas).	213
Figura 127. Municipio de Lillo. (a) Resultado de una partición espacial considerando 9 apriscos ($ e_i \leq 0.05$). (b) Ampliación del borde entre polígonos de pasto (todas las regiones son conexas).	214
Figura 128. Municipio de Lillo. Resultado de una partición espacial considerando 11 apriscos ($ e_i \leq 0.05$).	215
Figura 129. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 7 apriscos ($ e_i \leq 0.05$).	216
Figura 130. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 9 apriscos ($ e_i \leq 0.05$).	217
Figura 131. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 20 apriscos ($ e_i \leq 0.05$).	218
Figura 132. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 12 apriscos ($ e_i \leq 0.05$).	219
Figura 133. Polígonos de pasto en los municipios del área de estudio en 1999 (El Romeral (a), Lillo (b) y Corral de Almaguer (c)). Los polígonos marcados con un círculo rojo son los que están en uso desde el año 2004.	220
Figura 134. Municipio de Lillo. (a) Resultado de una partición espacial no válida considerando 12 apriscos ($ e_i \leq 0.05$). (b) Partición existente en el municipio en 1999 (realizada manualmente sobre cartografía analógica).	221
Figura 135. Municipio de El Romeral (I). (a) Resultado de una partición espacial no válida considerando 9 apriscos ($ e_i \leq 0.05$). (b) Partición existente en el municipio en 1999 (realizada manualmente sobre cartografía analógica).	222
Figura 136. Municipio de El Romeral (II). Resultado de una partición no válida considerando 9 apriscos ($ e_i \leq 0.05$).	224
Figura 137. Municipio de Corral de Almaguer (I). (a) Resultado de una partición espacial no válida de 17 apriscos ($ e_i \leq 0.05$). (b) Partición existente en el municipio en 1999 (realizada manualmente sobre cartografía analógica).	225
Figura 138. Municipio de Corral de Almaguer (II). Resultado de una partición no válida de 17 apriscos ($ e_i \leq 0.05$).	226
Figura 139. Polígonos de pasto correspondientes a apriscos situados en las proximidades del núcleo de población.	227
Figura 140. El cambio en la ubicación del aprisco genera un aumento de la eficiencia energética de los polígonos (b) respecto de los (a), al disminuir la longitud de los desplazamientos a las zonas de pasto.	228
Figura 141. Ejemplos de polígonos de pasto con formas anómalas por la geometría de las parcelas de tipo camino.	229
Figura 142. Detalle de la distribución de las parcelas de pasto (color verde) en el interior de dos polígonos.	236
Figura 143. Ejemplo de polígonos de pasto.	237
Figura 144. Ejemplos del valor del coeficiente de circularidad en varios polígonos de pasto.	238
Figura 145. Entorno definido por un polígono de pasto en el que se consideran dos clases: zona accesible (color verde) y no accesible al ganado.	254
Figura 146. Ejemplos del valor del índice de contagio en un territorio con dos clases.	256
Figura 147. Ejemplos del valor del índice de división en varios territorios (polígonos de pasto) estructurados en dos clases.	257
Figura 148. Ejemplos del valor del índice de fragmentación de la clase “zona accesible” (color verde) en diferentes territorios (polígonos de pasto).	258
Figura 149. Ejemplos del valor del índice de cohesión de la clase “zona accesible” (color verde) en 3 territorios.	259
Figura 150. Ejemplos del valor del índice de agregación de la clase “zona accesible” (color verde) en varios territorios.	260



<i>Figura 151. Ejemplos del valor del índice de agregación de la clase “zona accesible” (color verde) en varios territorios.</i>	262
<i>Figura 152. Ventana general de acceso a la aplicación.</i>	263
<i>Figura 153. Ventana de parámetros iniciales del conjunto de datos de entrada a la aplicación.</i>	264
<i>Figura 154. Controles de diálogo con el conjunto de datos de entrada a la aplicación, según se (a) seleccione o (b) no la opción “No realizar preproceso”</i>	265
<i>Figura 155. Ventanas con información sobre las acciones que realiza la aplicación tras introducir los datos de entrada.</i>	266
<i>Figura 156. Cuadro de diálogo para introducir el nombre que se asignará a la zonificación que va calcularse.</i>	266
<i>Figura 157. Ventana de gráficos donde se visualiza la información espacial y se introducen los valores de los parámetros necesarios para realizar una zonificación.</i>	267
<i>Figura 158. Tabla de colores.</i>	268
<i>Figura 159. Ventana con información sobre las acciones que realiza el programa mientras se calcula una zonificación.</i>	269
<i>Figura 160. Cuadro de diálogo para seleccionar o no la fase de postproceso.</i>	270
<i>Figura 161. Visualización del resultado de un proceso de zonificación en la ventana de gráficos.</i>	271
<i>Figura 162. Visualización de una zonificación: uso de tonos claros en parcelas no accesibles y tonos oscuros en parcelas transitables por el ganado.</i>	271
<i>Figura 163. Datos calculados en un proceso de zonificación.</i>	272
<i>Figura 164. Visualización de los datos específicos de cada una de las regiones de una zonificación.</i>	273
<i>Figura 165. Uso de las herramientas de zoom en la ventana de gráficos de una zonificación.</i>	273
<i>Figura 166. Menú para calcular una nueva zonificación a partir de un conjunto de datos existente. Cuadro de diálogo para introducir el nombre que se asignará a dicha zonificación.</i>	274
<i>Figura 167. Ventana de gráficos correspondiente a una nueva zonificación, antes y después de calcular la solución.</i>	274
<i>Figura 168. Ventanas de gráficos correspondientes a dos zonificaciones calculadas en la misma sesión y con el mismo conjunto de datos.</i>	275
<i>Figura 169. Ventana para eliminar el análisis realizado, al seleccionar el menú Análisis → Borrar.</i>	275
<i>Figura 170. Menú para abrir un fichero con datos y resultados de zonificaciones generadas con la aplicación.</i>	276
<i>Figura 171. Visualización de las zonificaciones almacenadas en un fichero *.tfc, resultado de un proceso previo de análisis.</i>	276





LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Campos de aplicación del diseño de zonas y criterios utilizados en ellos.</i>	19
<i>Tabla 2. Terminología y resumen de los criterios más comunes en las aplicaciones de diseño de zonas (I).</i>	35
<i>Tabla 3. Terminología y resumen de los criterios más comunes en las aplicaciones de diseño de zonas (II).</i>	36
<i>Tabla 4. Parámetros de clasificación de los modelos de solución para el diseño de zonas.</i>	52
<i>Tabla 5. Conjuntos de datos utilizados en diferentes métodos de solución para problemas de diseño de zonas (I).</i>	62
<i>Tabla 6. Conjuntos de datos utilizados en diferentes métodos de solución para problemas de diseño de zonas (II).</i>	63
<i>Tabla 7. Tabla de asignación de coeficientes forrajeros a usos del suelo agrícolas (I).</i>	73
<i>Tabla 8. Tabla de asignación de coeficientes forrajeros a usos del suelo agrícolas (II).</i>	74
<i>Tabla 9. Propiedades de los usos del suelo que deben especificarse para definir correctamente los polígonos de pasto.</i>	76
<i>Tabla 10. Atributos de las parcelas que deben especificarse para definir correctamente los polígonos de pasto.</i>	77
<i>Tabla 11. Tiempo total de ejecución de la aplicación en diferentes problemas de partición espacial.</i>	120
<i>Tabla 12. Tiempos de ejecución de los algoritmos principales de la aplicación, considerando conjuntos de datos de diferente número de unidades.</i>	122
<i>Tabla 13. Tiempos de ejecución de los algoritmos principales de la aplicación, generando particiones espaciales de diferente número de regiones.</i>	125
<i>Tabla 14. Tabla con los valores de errores relativos y error máximo correspondientes a zonificaciones generadas con el modelo alternativo de solución nº 2, para diferentes valores de C y $\varepsilon=0.1$.</i>	143
<i>Tabla 15. Datos de superficie de los municipios del área de estudio.</i>	149
<i>Tabla 16. Ejemplos de campos de aplicación de los Sistemas de Información Geográfica.</i>	153
<i>Tabla 17. Atributos definidos para la clase Municipios.</i>	158
<i>Tabla 18. Atributos definidos para la clase Usos Catastrales.</i>	159
<i>Tabla 19. Atributos definidos para la clase Usos Agrícolas.</i>	159
<i>Tabla 20. Atributos definidos para la clase Parcelas.</i>	159
<i>Tabla 21. Parámetros para la representación espacial de las entidades del proyecto.</i>	160
<i>Tabla 22. Tabla de metadatos básicos.</i>	161
<i>Tabla 23. Tabla de metadatos del catastro de rústica (1).</i>	162
<i>Tabla 24. Tabla de metadatos del catastro de rústica (2).</i>	163
<i>Tabla 25. Estructura original de las tablas de datos asociadas al parcelario de los municipios del área de estudio.</i>	164
<i>Tabla 26. Estructura original de la tabla de datos procedente del SIGPAC para los municipios del área de estudio.</i>	167
<i>Tabla 27. Estructura de las tablas de datos asociadas a los parcelarios de los municipios del área de estudio.</i>	177
<i>Tabla 28. Datos de las tablas asociadas al parcelario de los municipios del área de estudio.</i>	177
<i>Tabla 29. Valores de los usos del suelo asociados al parcelario catastral de los municipios del área de estudio.</i>	178
<i>Tabla 30. Tabla normalizada de valores de tipos de usos catastrales en el área de estudio.</i>	179
<i>Tabla 31. Estructura de tablas del parcelario del área de estudio tras el proceso de armonización semántica.</i>	180
<i>Tabla 32. Número total de unidades catastrales (subparcelas) y de unidades sin dato de uso del suelo.</i>	181
<i>Tabla 33. Ejemplo de unidades catastrales (subparcelas) con datos anómalos.</i>	182
<i>Tabla 34. Resultado de la edición realizada en unidades catastrales con datos anómalos.</i>	182
<i>Tabla 35. Usos catastrales y agrícolas (SIGPAC) del año 2005 para los municipios del área de estudio.</i>	185
<i>Tabla 36. Porcentaje de parcelas con un solo aprovechamiento en los datos de Catastro y del SIGPAC.</i>	188
<i>Tabla 37. Tabla inicial de recintos agrícolas del SIGPAC.</i>	189
<i>Tabla 38. Tabla final del SIGPAC con las unidades correspondientes a los recintos de mayor superficie de una parcela.</i>	189
<i>Tabla 39. Resultado del enlace entre el parcelario de un municipio y la base de datos del SIGPAC.</i>	190
<i>Tabla 40. Número total de parcelas y de superficies de descuento en los municipios del área de estudio.</i>	190
<i>Tabla 41. Tabla resumen de las características pastorales de los usos del suelo del área de estudio (I).</i>	192
<i>Tabla 42. Tabla resumen de las características pastorales de los usos del suelo del área de estudio (II).</i>	193
<i>Tabla 43. Valores iniciales de las variables “aprovechamiento” y “acceso” en función del atributo FAE de las parcelas.</i>	193
<i>Tabla 44. Ejemplo de la tabla de datos asociada al parcelario del área de estudio, como resultado de los procesos de integración y edición.</i>	194
<i>Tabla 45. Número de parcelas del viario en los municipios del área de estudio.</i>	196



<i>Tabla 46.</i> Número total de parcelas en los municipios del área de estudio, antes y después de la división del viario...	200
<i>Tabla 47.</i> Resumen de las características de los municipios del área de estudio.....	201
<i>Tabla 48.</i> Tablas de datos del parcelario de cada uno de los municipios del área de estudio.....	202
<i>Tabla 49.</i> Resumen del total de parcelas de cada municipio, indicando el nº de parcelas no transitables por el ganado.	203
<i>Tabla 50.</i> Variación de los errores de una partición tras introducir cambios en la posición de los generadores y en los tamaños de las zonas.....	223
<i>Tabla 51.</i> Tabla con los valores de los índices, de configuración y composición del paisaje, más adecuados para analizar la eficiencia energética de los polígonos de pasto.....	261



1. INTRODUCCIÓN



“Siempre son las dificultades del tamaño de los intentos”
(Antonio de Solís)



1 INTRODUCCIÓN

Esta tesis desarrolla un método de partición espacial según los criterios correspondientes al diseño de zonas para el aprovechamiento de recursos naturales, como es el caso de los polígonos de pasto en el contexto de la gestión de sistemas extensivos agropecuarios. Este capítulo ofrece una descripción del problema que se investiga, de la metodología, las hipótesis y los objetivos de investigación y un resumen de los capítulos siguientes.

1.1 Antecedentes

Los procesos de partición espacial implican la división de un espacio geográfico en diferentes unidades o zonas según un conjunto específico de criterios. En ámbitos relacionados con las ciencias geoespaciales y la planificación territorial, la delimitación de las nuevas zonas se realiza por agrupación de otras unidades básicas de área (códigos postales, secciones censales, distritos, barrios...), representativas de una cierta estructura administrativa, jurisdiccional, política, etc., correspondiente al espacio de trabajo. De hecho, este problema se conoce por el nombre genérico de diseño de zonas, y consiste fundamentalmente en la agregación de un conjunto de N unidades básicas en un número M menor de regiones o zonas que han de verificar unos criterios que dependen de cada caso en particular.

El diseño de zonas es un problema geográfico de gran relevancia presente en un amplio espectro de aplicaciones, desde la delimitación de distritos electorales a la de áreas específicas para la asignación de servicios socio-económicos, tales como servicios escolares, médicos, de ventas de productos, de recogida de basuras, etc. De todas las aplicaciones de este problema, las más estudiadas han sido las correspondientes a la demarcación de distritos político-electorales y zonas de ventas.

Todos los problemas de zonificación están condicionados tanto por criterios temáticos, dependientes del contexto, como por otros de carácter geográfico que pueden considerarse restricciones espaciales. Los criterios temáticos que se establecen en las aplicaciones varían considerablemente de una a otra y pueden fijar condiciones de índole diversa, ya sean de carácter económico -relativas a promedios de ventas potenciales, trabajo o número de vendedores...-, demográfico -relativas al número de habitantes, población con capacidad de voto...-, etc. No obstante, el objetivo fundamental de estos procesos consiste en crear zonas equilibradas, es decir, zonas de tamaño similar respecto a uno o varios de estos criterios (zonas con igual número de habitantes, igual promedio de ventas, etc.). En el caso de las restricciones espaciales existe un conjunto básico de condiciones, presentes en la mayoría de los casos, que tienen que ver con el tamaño, la forma y las relaciones espaciales entre las unidades del territorio (Shirabe y Tomlin 2002; Shirabe 2005). Como ejemplo de este tipo de criterios destacan los siguientes:



- Integridad: esta condición se refiere a que cada unidad espacial elemental ha de ser asignada a una única región.
- Conectividad: un territorio, región o zona es conexo si, entre dos cualesquiera de sus puntos, existe un camino totalmente incluido en él. Un territorio, región o zona tiene la propiedad de conectividad si es conexo. Una región se construirá a partir de un conjunto de unidades espaciales elementales geográficamente conectadas. Puede afirmarse que la propiedad de conectividad es el criterio prioritario en los problemas de reparto espacial (Shirabe 2005).
- Compacidad: un territorio, región o zona puede considerarse compacto si tiene una forma próxima a la de un círculo o un cuadrado.

Hasta ahora, los métodos empleados para forzar la conectividad en problemas de partición espacial abordan la búsqueda de soluciones con dos tipos de procedimientos: heurísticos y exactos. Estos últimos se han descartado, ya que un análisis combinatorio del problema indica que el número de soluciones tiene un comportamiento exponencial respecto al número N de unidades básicas, lo que pone de manifiesto que estas técnicas de búsqueda exhaustiva sólo pueden ser útiles en casos donde N es bastante reducido (Horn 1995), de hecho no se han aplicado a problemas con más de 100 unidades (Kalesics et al. 2005). Las técnicas heurísticas (Horn 1995; Brookes 1997; Mehrotra, Johnson y Nemhauser 1998) son capaces de encontrar buenas soluciones, pero no pueden garantizar matemáticamente la mejor solución y, generalmente, tampoco determinar la desviación respecto a ésta. La mayoría de estos procedimientos se implementan en modelos de programación entera o mixta (Zoltners y Sinha 1983; Williams 2002; Aerts et al. 2003), modelos de partición de grafos (Guo et al. 2000; D'Amico et al. 2002; Assunção et al. 2006) o modelos de análisis cluster (Haining et al. 1996; Tiede y Strobl 2006; Ochoa et al. 2009), en los que se han utilizado heurísticas tales como recocido simulado (simulated annealing), búsqueda tabú (tabu search) o algoritmos genéticos, con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir el tiempo y coste computacional de las aplicaciones informáticas desarrolladas. En general, estos métodos tratan el problema de partición espacial como uno de optimización combinatoria (Altman 1997; Guo et al. 2000), donde las unidades superficiales existentes se agrupan en un número menor de zonas de manera que se optimiza una función. No obstante, la complejidad de los problemas de diseño de zonas requiere algoritmos específicos para los diferentes casos, por lo que resulta muy difícil definir funciones genéricas que proporcionen una solución de carácter “universal”.

La mayoría de los métodos y algoritmos han sido implementados en aplicaciones de diseño automático de zonas. Dichas aplicaciones se han desarrollado como programas independientes o bien han sido integradas en el entorno de un Sistema de Información Geográfica (SIG), ya que estas plataformas, dotadas de funciones de gestión, almacenamiento,



visualización y análisis espacial de datos geográficos, carecen de herramientas de partición espacial. Por este motivo, más de la mitad de las aplicaciones desarrolladas entre 1995 y 2003 han utilizado fundamentalmente los programas de SIG para el almacenamiento de datos y la visualización de resultados (Bong et al. 2004). De hecho, estas aplicaciones se han implementado como herramientas para el tratamiento de problemas específicos más que como herramientas genéricas y versátiles de partición espacial.

En resumen, la situación actual pone de manifiesto la existencia de una gran variedad de aplicaciones adaptadas a problemas particulares, constatando la dificultad que supone generalizar los criterios del diseño de zonas, ya que pueden variar considerablemente de un problema a otro.

1.2 Planteamiento del problema

A los campos de aplicación tradicionales del diseño de zonas pueden añadirse otros, enmarcados dentro de iniciativas o políticas de desarrollo sostenible, cuyo objetivo es mejorar el planeamiento y la gestión de los recursos naturales mediante el uso intensivo de los sistemas de información. En Europa, el desarrollo rural y la conservación de los recursos naturales se han convertido en temas prioritarios de la política comunitaria. Al margen de la Comisión Europea y del Comité para la Conservación de la Naturaleza se han creado varios foros, como el Foro Europeo sobre Pastoreo y Conservación de la Naturaleza destinado a la revalorización de los sistemas agropecuarios tradicionales.

Actualmente, las dos demandas sociales más importantes que se piden al medio rural son la producción de alimentos de calidad y la necesidad de controlar los efectos ambientales de los sistemas agrícolas. El dominio de la producción agrícola intensiva, tanto en España como en el resto de Europa, no satisface ambos objetivos. Sin embargo en España, al contrario que en otros países europeos, todavía existen amplias áreas rurales donde los sistemas agrícolas extensivos son dominantes. Para facilitar la explotación de estos sistemas, haciéndolos compatibles con las labores de pastoreo y gestión ganadera, se han propuesto iniciativas de asistencia técnica que mejoran la capacidad y eficacia tanto de las administraciones como de los colectivos locales existentes en estas regiones. Una de estas propuestas va dirigida a los sistemas de tipo extensivo cereal-ovino, donde la producción, tanto de cereales en secano como de leche y carne de ovino, se realizan sobre las mismas unidades o parcelas de suelo agrícola (Caballero 2001). Estas parcelas, de reducidas dimensiones y con diferentes usos (cereales, barbechos, rastrojeras, leguminosas, eriales, pastos naturales, etc.), se agrupan, dentro de cada municipio, en unidades de mayor superficie (polígonos de pastos) que permiten el mantenimiento de rebaños de ovino y caprino, rebaños de una dimensión económica específica.



El sistema extensivo de Castilla-La Mancha tiene condiciones específicas que hacen que los ganaderos de ovino no dispongan de base territorial propia, por lo que, para el suministro de nutrientes, dependen principalmente de residuos agrícolas del entorno. El sistema que permite poner de acuerdo a los agricultores y ganaderos está intervenido por las administraciones que han creado las denominadas Comisiones Locales de Pastos en las cuales, los dos colectivos involucrados, agricultores y ganaderos, son coordinados por la administración local. Estas Comisiones se encargan de la gestión de los recursos pastorales, distribuyendo los pastos del municipio en polígonos que son asignados a los ganaderos. La vigente Ley de Pastos les atribuye una serie de competencias que, en buena parte, no son capaces de asumir por falta de apoyo técnico y funcional que les permita desarrollar su actividad de modo eficiente (Caballero 2003). Una de estas competencias es la definición periódica de los polígonos de pastos, tarea que se realiza en función de la costumbre y usos tradicionales por carecer de medios y herramientas técnicas adecuadas.

Dado que los rebaños se guardan en unas localizaciones específicas, denominadas apriscos, las zonas o polígonos de pasto han de formar recintos conexos que contengan las parcelas donde se ubican dichos apriscos. Cada parcela del territorio sólo podrá ser asignada a un único polígono de pasto o zona. A diferencia de otras aplicaciones, las zonas generadas no tienen que ser similares respecto al criterio básico de agregación, que en este caso es el total de la superficie forrajera de sus parcelas. Esta superficie determina la capacidad potencial de producir forraje que es la base de la alimentación de cada rebaño. En este caso, cada polígono de pasto tendrá un tamaño ajustado a las necesidades alimenticias del rebaño al que está destinado.

Este tipo de zonificaciones no han sido lo suficientemente investigadas, de manera que no se conocen modelos de solución y/o aplicaciones para la delimitación automática de las zonas. La necesidad de definir particiones espaciales cuyos elementos tengan un tamaño predeterminado, ajustado a las características de cada caso, introduce una problemática específica en el diseño de zonas.

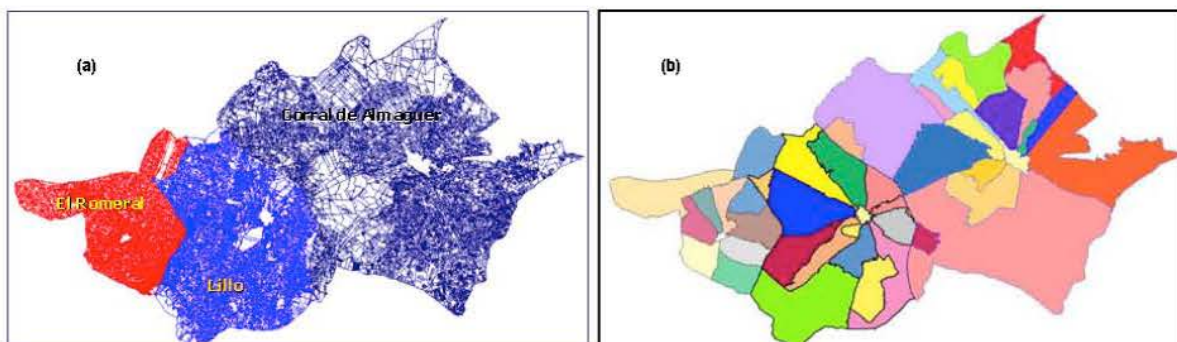


Figura 1. (a) Parcelas catastrales de tres municipios de Castilla-La Mancha. (b) Polígonos definidos en dichos municipios por las correspondientes Comisiones Locales de Pasto.



1.3 Hipótesis, objetivos y aportaciones de la investigación

La hipótesis de esta tesis es que el problema de partición espacial, que se plantea en el contexto de los sistemas extensivos agropecuarios, tiene unas características y restricciones específicas que hacen posible el diseño de un nuevo modelo de solución para este tipo de zonificaciones. Por este motivo, se pretende desarrollar un método que integre técnicas de SIG con una heurística basada en la teoría de los Diagramas de Voronoi Generalizados y que se caracterice por:

- *generar zonas de un tamaño predeterminado* respecto a uno o varios atributos de medida y
- *ser eficiente en el tratamiento de un gran número de unidades superficiales.*

El objetivo principal de esta tesis será el diseño de un algoritmo heurístico de zonificación, válido en la gestión de sistemas extensivos agropecuarios y en otros problemas de características similares, cuya finalidad sea la definición de zonas de un tamaño predeterminado, ajustado a las necesidades del contexto. Para llevar a cabo este objetivo se procederá al estudio de los modelos y técnicas matemáticas usados en los problemas más característicos del diseño de zonas.

Para garantizar una exploración exhaustiva del tema de estudio y la subsiguiente verificación o rechazo de la hipótesis planteada, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Estudio de los modelos de solución y algoritmos utilizados en diferentes campos de aplicación del diseño de zonas. Análisis de las aportaciones y deficiencias de estos algoritmos, para plantear un método alternativo de trabajo más rápido y eficiente. Con este estudio se determinará si los Diagramas de Voronoi Generalizados son una herramienta apropiada para ser aplicada en esta investigación.
2. Estudio de las necesidades y restricciones que caracterizan a los problemas de partición espacial asociados a la gestión de sistemas extensivos agropecuarios. Este objetivo proporciona la capacidad de especificar las condiciones y criterios que serán usados para desarrollar y verificar el prototipo.
3. Diseño de un modelo de solución para problemas de partición espacial cuyas características sean similares a las del problema objeto de estudio. El modelo incluirá técnicas y algoritmos que optimicen la agrupación de entidades superficiales en función de los criterios temáticos y geométricos de este tipo de problemas.



4. Desarrollo de una aplicación prototipo en un entorno SIG que, utilizando herramientas de análisis espacial de estos sistemas y algoritmos geométricos no disponibles en ellos, como los Diagramas de Voronoi Generalizados, permita el trazado automático de zonas en función de una serie de criterios. Con esta aplicación se podrá analizar la viabilidad del modelo y de los métodos diseñados, utilizando como caso de estudio la gestión de los recursos pastorales para la ganadería extensiva en Castilla-La Mancha.
5. Aplicación de la metodología desarrollada al problema de diseño de zonas en sistemas extensivos agropecuarios. Este objetivo implica la construcción de un SIG con un conjunto de datos apto para verificar el algoritmo de zonificación. Este sistema permitirá evaluar las fortalezas y deficiencias del prototipo desarrollado, haciendo posible la aceptación o el refinamiento de las hipótesis iniciales.

La principal contribución de esta investigación consistirá en el diseño de una metodología de partición espacial ajustada a las condiciones del problema de diseño de zonas en el contexto de la gestión de sistemas extensivos agropecuarios.

La segunda contribución de esta tesis será el desarrollo de una aplicación prototipo para el diseño automático de zonas, usando tecnología SIG y métodos heurísticos de geometría computacional. Esta aplicación facilitará la labor de las Comisiones Locales de Pastos, permitiendo la rápida generación de zonas de pastoreo según condiciones y criterios diversos, lo que optimizará la gestión de los recursos ganaderos, no sólo a nivel local, sino en otros ámbitos administrativos.



1.4 Metodología utilizada y recursos disponibles

La metodología a emplear parte de un estudio de los algoritmos de partición espacial, utilizados en diferentes campos de aplicación, para la creación de regiones o zonas. La mayoría de los métodos para la creación de nuevos sistemas zonales asumen, como punto de partida, la existencia de un conjunto previo de unidades. Este hecho implica que el énfasis de la investigación recae en la exploración y uso de técnicas de optimización, dejando a un lado los procesos que han generado el conjunto original de datos. Estos métodos se aplican a particiones cuyo objetivo es definir zonas de tamaño similar, por lo que no pueden utilizarse en el problema que estudia esta tesis, planteando la necesidad de diseñar un nuevo modelo de solución.

Para contrastar y verificar la metodología que se propone, se utilizará el parcelario catastral de tres municipios de Toledo (El Romeral, Corral de Almaguer y Lillo) en el desarrollo de una aplicación para el trazado automático de polígonos de pastos. Los datos originales serán sometidos a un proceso de integración y edición espacial, de forma que las parcelas superficiales formen un recubrimiento excluyente y exhaustivo de la zona de estudio. Para unificar el número y tipo de atributos asociados a las parcelas de los diferentes municipios, se llevará a cabo una revisión o edición temática usando información procedente del SIGPAC¹. Con el conjunto final de datos se construirá un sistema de información geográfica adecuado a la gestión de los recursos agrícolas y ganaderos de la zona.

La aplicación de la metodología propuesta requerirá una fase de preproceso espacial o adecuación de las geometrías que caracterizan a las parcelas de tipo vías o caminos, para evitar la definición de polígonos con formas geométricas anómalas.

En la fase siguiente se establecerán las restricciones o criterios de reparto que han de controlar el proceso de agrupación de las parcelas en unidades de orden superior que, en el caso de estudio, se corresponden con los polígonos de pastos. Las propiedades de estas regiones permiten definir el tipo de restricciones a tener en cuenta, por ejemplo:

- Las regiones serán recintos conexos.
- El tamaño de las regiones se ajustará a las especificaciones del problema. El tamaño se define en función del valor de uno o varios atributos, y forma parte de los datos de entrada.
- ...

¹ El SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de parcelas agrícolas) consta de un mosaico de ortofotos digitales que abarcan todo el territorio nacional, sobre las que, inicialmente, se superponen los planos parcelarios de catastro de rústica, de forma que, para cada referencia concreta, el sistema proporciona automáticamente la imagen en pantalla de la parcela referenciada.



Por último, a partir del sistema de información geográfica elaborado, de los criterios de agrupación establecidos y de la aplicación informática desarrollada, se procederá a la partición espacial y a la generación automática de los polígonos de pasto.

1.5 Estructura de la tesis

Para alcanzar los objetivos propuestos y desarrollar el proceso de investigación, la tesis ha sido estructurada en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Introducción.

Se detalla el problema investigado y se describe el contexto al que pertenece. En relación a dicho problema, se plantean las hipótesis, los objetivos y el método de investigación correspondientes.

- Capítulo 2: Estado del arte.

Se ofrece una revisión histórica de los diferentes campos de aplicación del diseño de zonas. Se realiza una exploración exhaustiva de los modelos de solución usados en los problemas de este tipo, mostrando las complejidades teóricas inherentes a la segmentación del espacio por agregación de unidades de área. Se establece una clasificación de estos modelos en función de los algoritmos y técnicas matemáticas que utilizan, analizando las aportaciones y limitaciones de cada uno de ellos.

- Capítulo 3: Modelo de solución propuesto.

Se explica el método de solución diseñado, el proceso de investigación seguido en el desarrollo del algoritmo, describiendo alguna de las alternativas estudiadas, y los experimentos realizados para comprobar la viabilidad del modelo final.

- Capítulo 4: Aplicación del modelo al caso de estudio.

Se evalúa la aplicación prototipo resultado de la implementación del algoritmo diseñado en el capítulo 3. Este proceso se lleva a cabo con los datos de un proyecto de SIG para la gestión de los recursos agrícolas y ganaderos de la zona de estudio. Se describen las fases realizadas para elaborar este proyecto y los experimentos realizados con sus datos. Los resultados de las pruebas muestran, por un lado, la validez del modelo de solución para resolver problemas de zonificación en sistemas extensivos de tipo cereal-ovino y, por otro, permiten confirmar la hipótesis establecida en el capítulo 1.



- Capítulo 5: Conclusiones.

Se presentan las conclusiones, aportaciones del trabajo realizado y una propuesta de futuras líneas de investigación.

- Capítulo 6: Referencias bibliográficas.

1.6 Resumen del capítulo

El capítulo 1 describe el escenario de trabajo, planteando el problema que es objeto de investigación en esta tesis. A continuación se detallan las hipótesis, los objetivos y el método de investigación correspondiente a la tesis.



2. ESTADO DEL ARTE



“Lo que sabemos es una gota de agua, lo que ignoramos es el océano”
(Isaac Newton)



2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se ofrece una revisión histórica de los diferentes campos de aplicación del diseño de zonas. Se realiza una exploración exhaustiva de los modelos y técnicas matemáticas usadas en los problemas de este tipo. Por último, también se citan los programas y aplicaciones informáticas existentes para el trazado automático de zonas.

2.1 Introducción

2.1.1 El diseño de zonas: un problema de partición espacial

Los procesos de partición espacial implican la división de un espacio geográfico en diferentes unidades o zonas según un conjunto específico de criterios. En ámbitos relacionados con las ciencias geoespaciales y la planificación territorial, la delimitación de las estas zonas se realiza por agrupación de otras unidades básicas de área (códigos postales, secciones censales, distritos, barrios...), pertenecientes a alguna estructura administrativa, jurisdiccional, política, etc., del espacio o dominio considerado. La agregación de estas unidades se realiza conforme a una serie de criterios específicos que han de satisfacer las zonas generadas. El término anglosajón “cluster” ha sido empleado de forma genérica para referirse a estos grupos de unidades que, dependiendo del contexto o ámbito de aplicación, pueden recibir nombres diferentes como “zonas”, “regiones”, “distritos”, “territorios”, “turfs”, etc.

En relación con lo anterior, en la literatura correspondiente a los problemas de partición, se hace alusión a ellos con una serie de vocablos o expresiones diferentes, tales como: regionalización (regionalization), diseño de zonas (zone design), zonificación (zoning), delimitación de distritos² (districting y redistricting), diseño o demarcación del territorio (territory design, territory alignment), asignación de unidades espaciales (spatial unit allocation), “clustering” espacial o geográfico, agregación espacial -territorial o geográfica-, clasificación, partición (partitioning), teselación espacial (spatial tessellations), etc. A continuación se citan algunas de las expresiones utilizadas por diversos autores:

² El término distrito se refiere a una unidad de gestión administrativa o de cualquier otro tipo, por ejemplo los distritos electorales.



- Guo et al. (2000): “A lo largo del tiempo se ha hecho alusión al problema del **diseño de zonas** con diferentes acepciones, tales como: el problema de zonificación automática (Openshaw 1978), de asignación de tierras (Benabdallah y Wright 1992), de demarcación de distritos (Macmillan y Pierce 1992) y el problema de la partición en regiones (Horn 1995)”.
- Bação et al. (2005): “El problema del **diseño de zonas**, también conocido como “districting”, implica la agregación espacial de N zonas en M regiones, siendo M menor que N. Las restricciones del problema de diseño de zonas son similares a las que caracterizan el problema de clustering”.
- Horn (1995): “La **regionalización** es un procedimiento de clasificación aplicado a objetos espaciales o unidades de área, que consiste en agruparlos en regiones homogéneas y conexas. Esta técnica busca una nueva partición del espacio de estudio en un número menor de objetos, generando nuevas unidades superficiales o regiones de mayores dimensiones geográficas. Cuando este proceso se aplica a unidades socio-económicas también se denomina “diseño de zonas”.
- Tiede y Strobl (2006): “..., la **regionalización** es una clasificación basada en atributos a la que se añaden las restricciones de conectividad o proximidad espacial”.
- Assunção et al. (2006): “En un gran número de aplicaciones geográficas..., es necesario agrupar un elevado número de objetos espaciales en un número menor de subconjuntos de objetos, subconjuntos que sean internamente homogéneos y se distribuyan espacialmente en regiones contiguas. A este proceso se le denomina **regionalización**, ya que da lugar a nuevas áreas (o regiones) de una mayor extensión”.
- Corrêa et al. (2002): “La **regionalización** es un proceso de agregación de unidades de área en regiones homogéneas y conexas en el espacio”.
- Bong et al. (2004): “El proceso de “**redistricting**” consiste en la partición de zonas geográficas en territorios, teniendo en consideración una serie de criterios. Este proceso requiere una codificación explícita de la topología para agrupar pequeñas unidades espaciales de área en regiones de mayor tamaño, siendo también necesario que cada unidad espacial tenga asociados sus atributos”.
- Tavares-Pereira et al. (2007): “La **partición de un territorio** en diferentes zonas “homogéneas”, teniendo en cuenta múltiples criterios, consiste en agrupar unidades elementales del territorio para formar un conjunto de **distritos o zonas**”.
- Kalsics et al. (2005): “El **diseño del territorio** puede describirse como un problema consistente en la agrupación de pequeñas unidades superficiales, denominadas áreas básicas, en clusters geográficos de mayor tamaño, denominados territorios, de forma que éstos se ajusten a determinados criterios de planificación”.



- Shirabe (2005): “Un problema de asignación de unidades espaciales (*spatial unit allocation*) consiste básicamente en un proceso de selección de subconjuntos a partir de un conjunto de unidades espaciales, subconjuntos que denominaremos regiones, según una serie de criterios específicos”.

Teniendo en cuenta que la expresión “territory design” está más difundida en el ámbito comercial, en relación con la distribución de productos y la gestión de ventas (sales territory) y, tras revisar las definiciones³ de territorio, región y zona, en este trabajo se adoptará la expresión “*diseño de zonas*” y el término “*zonificación*” para hacer referencia a la partición de un territorio o espacio geográfico, organizado en un conjunto de unidades superficiales básicas. El proceso se realiza mediante la asignación de dichas unidades a otras de rango mayor que configuran una nueva estructura espacial. En definitiva, se crean una serie de regiones o zonas por agrupación de otras unidades espaciales que se seleccionan en función de un conjunto específico de criterios. El proceso también puede definirse como un método de clasificación que, aplicado a un conjunto de N objetos o unidades superficiales, da lugar, mediante agrupación, a un número M menor de regiones o zonas que han de verificar unos criterios predeterminados.

3 Territorio:

- “Porción de la superficie terrestre perteneciente a una nación, región, provincia, etc.” (Diccionario RAE).
- “Porción extensa de tierra, determinada geográficamente de modo natural, o políticamente o como ámbito jurisdiccional” (Diccionario María Moliner).

Región:

- “Porción de territorio determinada por caracteres étnicos o circunstancias especiales de clima, producción, topografía, administración, gobierno...” (Diccionario RAE).
- “Cada una de las grandes divisiones territoriales de una nación, definida por características geográficas e histórico-sociales” (Diccionario RAE).
- “Porción de territorio señalada con límites arbitrarios” (Diccionario María Moliner).

Zona:

- “Cualquier parte de terreno o de superficie encuadrada entre ciertos límites” (Diccionario RAE).
- “Parte delimitada o precisada en cualquier forma en la superficie terrestre o en otra cosa cualquiera” (Diccionario María Moliner).
- “Área que tiene características o propiedades específicas” (Diccionario Collins).



2.1.2 Campos de aplicación del diseño de zonas

El diseño de zonas es un problema geográfico de gran relevancia, presente en un amplio espectro de aplicaciones, desde la delimitación de distritos electorales a la de áreas específicas para la asignación de servicios socio-económicos, tales como servicios escolares, médicos, de ventas de productos, de recogida de basuras, etc. De todas las aplicaciones de este problema, las más estudiadas han sido las correspondientes a la demarcación de distritos político-electorales y zonas de ventas. A continuación se citan los campos de aplicación más relevantes, algunos de los cuales aparecen descritos con más detalle en el texto de Kalsics et al. (2005).

1) Demarcación de distritos político-electorales

Este problema consiste en la división de un área administrativa, como una ciudad o una comunidad autónoma, en subáreas (distritos) cuya función consiste en elegir a los candidatos políticos que han de ser sus representantes. La definición de los límites de estos distritos ha de satisfacer una serie de criterios legislativos que dependerán de cada país y de la jurisdicción implicada. En líneas generales, los objetivos fundamentales que guían este proceso tienden a crear distritos con un tamaño poblacional similar, lo más compactos⁴ posible, desde el punto de vista de su forma y dimensiones geográficas, y que constituyan recintos espaciales conexos.

En este ámbito destacan los trabajos e investigaciones llevados a cabo por Benabdallah y Wright (1992), Horn (1995), Williams (1995), Hojati (1996), Mehrotra et al. (1998) y Ricca y Simeone (1997).

Otra variante de este problema se presenta en la delimitación de zonas socio-económicas sometidas a una determinada jurisdicción o control administrativo. En este campo destacan fundamentalmente los trabajos de Openshaw (1977, 2001...), Alvanides et al. (2002) y Martin (1998, 2000, 2003). También cabe señalar las investigaciones realizadas por Rajabifard y Williamson (2001) y Eagleson et al. (2001, 2002) en la demarcación de unidades administrativas.

2) Diseño de áreas de mercado o “territorios” de ventas y prestación de servicios

Este problema es común a todas las empresas que gestionan fuerzas de venta y necesitan subdividir su espacio de mercado en regiones o zonas de responsabilidad. Otro problema muy vinculado a éste es el diseño de zonas para la prestación de servicios, ya sea para satisfacer la demanda de clientes o la de ciertas infraestructuras (equipamientos técnicos). Además, en estos ámbitos, existe una continua necesidad de redefinir las regiones existentes o crear otras nuevas.

⁴ Cox (1973) define esta propiedad como “la forma que maximiza, en la zona o recinto, la proximidad de unas localizaciones a otras respecto de su proximidad a localizaciones fuera del recinto”.



En principio, cualquier cambio en el número de ventas o servicios prestados exige un reajuste de las zonas. Además, existen otras razones para dichos reajustes, tales como conseguir, con los empleados de la empresa, una mejor cobertura de servicios o un reparto más equilibrado del trabajo entre ellos, etc. La investigación llevada a cabo por Zoltners y Sinha (1983, 2001) es uno de los referentes para el establecimiento de los criterios básicos aplicables al diseño de este tipo de zonas.

Al igual que en el caso anterior, los principales objetivos que guían este proceso tienden a crear regiones homogéneas en lo que respecta a uno o varios atributos (nivel medio de ventas, número de clientes potenciales...), que sean lo más compactas posible, de modo que se minimicen los tiempos de viaje de los vendedores para aumentar su eficiencia, y que constituyan recintos espaciales conexos.

En este tipo de aplicaciones es necesario decidir con antelación cuáles serán las unidades básicas que serán agrupadas durante el proceso, ya que es imprescindible agregar los datos relativos a clientes y ventas según dichos elementos. Al realizar la partición, también se suelen considerar, como núcleos generadores de las zonas, las unidades donde se ubican los vendedores (oficina, lugar de residencia...).

En este ámbito destacan los trabajos e investigaciones llevadas a cabo por Hess y Samuels (1971), Segal y Weinberger (1977), Zaloom (1982), Zoltners y Sinha (1983), Fleischmann y Paraschis (1988) y Ríos-Mercado y Fernández (2009).

3) Otros campos de aplicación

3.1) Zonas receptoras de los servicios correspondientes a equipamientos ubicados en localizaciones fijas (*Territories for facilities providing service at a fixed location*)

En muchas situaciones, los clientes tienen que acudir a un equipamiento (público o privado) para la prestación de un servicio, como por ejemplo: colegios, hospitales, etc. Para facilitar la asignación de este tipo de recursos a la población, se suelen generar zonas o regiones conexas por agregación de unidades administrativas -de un cierto orden o rango-, de forma que los habitantes recibirán servicio del equipamiento existente en su región. En estos casos, el proceso de zonificación tiene por objeto crear regiones equilibradas en lo que concierne al reparto de recursos por habitante, y al igual que en otras aplicaciones, se intenta que dichas zonas sean compactas y conexas.

En la delimitación de zonas escolares destacan los trabajos de Armstrong et al. (1993), Stillwell y Langley (1999), Caro et al. (2004) y Ahmadi (2006).



3.2) Zonas receptoras de servicios que se prestan a domicilio (*On site service territories*)

Muchas instituciones, generalmente públicas, prestan sus servicios de forma distribuida en un determinado ámbito geográfico. Tal es el caso de los servicios de recogida de basura, limpieza de calles, asignación de ambulancias o de unidades de policía, bomberos, etc. En este tipo de zonificaciones también interesa que las regiones estén lo más equilibradas posible respecto a la asignación de servicios, y que sean compactas y conexas.

En este ámbito de aplicación destacan los trabajos realizados por Muyldermans et al. (2002), en la planificación de las operaciones de reparto de sal en las carreteras, y D’Amico et al. (2002) en la delimitación de distritos de policía.

3.3) Zonas receptoras de recursos energéticos

El caso más representativo de este tipo de zonificación corresponde a la distribución de la energía eléctrica, cuyo problema reside en la partición física de la red, para generar zonas de distribución económicamente viables desde el punto de vista de las compañías eléctricas. Para generar un entorno de mercado que fomente la competitividad entre empresas, interesa que las zonas definidas sean equilibradas, respecto a su potencial económico de ganancias, que sean lo más compactas posible para facilitar su gestión y mantenimiento, que formen recintos conexos y no se superpongan espacialmente, es decir, que cada punto del espacio sólo pueda recibir servicio de una determinada compañía.

Entre los trabajos realizados en este campo destacan los de Bergey et al. (2003) y Tiede y Strobl (2006).

3.4) Zonas para la asignación de usos del suelo (*Land allocation/acquisition*)

El objetivo principal de las aplicaciones destinadas a la planificación de usos del suelo es la selección de conjuntos de parcelas u otras unidades del terreno para implantar un determinado uso, de forma que se consiga un aprovechamiento sostenible y eficiente de los recursos y actividades productivas, se mejore la protección medioambiental y se facilite la igualdad social. En este tipo de actividades se realiza un estudio previo del patrón de usos del suelo existente para analizar los cambios a introducir en la asignación de dichos usos, cambios que dependerán de los objetivos de la planificación (gestión forestal, adquisición y reparto de tierras, restauración y conservación del paisaje...). Además, en algunas de estas aplicaciones, el objetivo principal es la adquisición de terrenos, de forma que las parcelas se agrupen en zonas de máxima superficie y mínimo coste. En estos casos, la asignación de usos de suelo a las parcelas no sólo determina las características de la región que será dedicada a un cierto uso, sino su coste final.

En líneas generales, se pretende que las zonas sean recintos conexos, lo más compactos posible y que permitan una explotación eficiente de sus recursos.



En este ámbito destacan los trabajos e investigaciones llevadas a cabo por Wright et al. (1983), Gilbert et al. (1985), Tomlin y Johnston (1990), Diamond y Wright (1991), Benabdallah y Wright (1992), López-Blanco (1994), Crema (1996), Eastman et al. (1998), Cromley y Hanink (1999), Cova y Church (2000), Williams (2002) y Aerts et al. (2003).

4) Nuevo campo de aplicación: Zonas para la explotación o gestión de los recursos existentes

A los campos de aplicación citados anteriormente, podría añadirse otro enmarcado dentro de iniciativas o políticas de desarrollo sostenible, cuyo objetivo es mejorar el planeamiento y la gestión de los recursos naturales. En Europa, el desarrollo rural y la conservación de los recursos naturales se han convertido en temas prioritarios de la política comunitaria. Al margen de la Comisión Europea y del Comité para la Conservación de la Naturaleza, se han creado varios foros, como el Foro Europeo sobre Pastoreo y Conservación de la Naturaleza destinado a la revalorización de los sistemas agropecuarios tradicionales.

Los sistemas agrícolas extensivos se caracterizan por un menor uso de insumos agrícolas, unas prácticas agrícolas y ganaderas generalmente respetuosas con los valores ambientales y una producción potencial de alimentos de calidad. En este contexto se sitúan los sistemas agropecuarios de tipo extensivo cereal-ovino, en los que la producción, tanto de cereales en secano como de leche y carne de ovino, se realiza sobre las mismas unidades o parcelas de suelo agrícola. Estas parcelas, de reducidas dimensiones y con diferentes usos (cereales, barbechos, rastrojeras, leguminosas, eriales, pastos naturales, etc.), se agrupan, dentro de cada municipio, en unidades de mayor superficie (polígonos de pastos) que permiten el mantenimiento del ganado de ovino y caprino. Dado que los rebaños se guardan en unas localizaciones específicas, denominadas apriscos, las zonas han de formar recintos conexos que contengan las parcelas donde se ubican dichos apriscos. Cada parcela sólo podrá ser asignada a un único polígono de pasto o zona. A diferencia de las aplicaciones anteriores, las zonas generadas no tienen que ser homogéneas respecto a su producción forrajera, que será la base de la alimentación del ganado. En este caso, cada polígono de pasto tendrá un tamaño ajustado a las necesidades alimenticias del rebaño al que está destinado.

Este tipo de zonificaciones no han sido lo suficientemente investigadas, de manera que no se conocen modelos de solución y/o aplicaciones para la delimitación automática de las zonas. La necesidad de definir particiones espaciales cuyos elementos tengan un tamaño predeterminado, ajustado a las características de cada caso, introduce una problemática específica en el diseño de zonas.



En esta línea de investigación, pero en un ámbito no geográfico, como son los espacios de información, destacan los trabajos de Reitsma et al. (2004), Reitsma y Trubin (2007) y la tesis “Information Space Mapping with Adaptive Multiplicatively Weighted Voronoi Diagrams” de Stanislav I. Trubin (2006). El método desarrollado permite la partición de un espacio de información en zonas de un tamaño o volumen de datos predeterminado.

Los procesos de zonificación citados anteriormente están condicionados tanto por criterios temáticos, dependientes del contexto, como por otros de carácter geográfico que pueden considerarse restricciones espaciales. Los criterios específicos pueden establecer condiciones de índole diversa, ya sean de carácter económico -relativas a promedio de ventas potenciales, trabajo o número de vendedores...-, demográfico -relativas al número de habitantes, población con capacidad de voto...-, etc. Exceptuando las zonificaciones destinadas a la adquisición de terrenos y a la explotación o gestión de recursos, el objetivo fundamental del resto de aplicaciones consiste en crear zonas equilibradas, es decir, zonas que tienen un tamaño similar respecto a uno o varios criterios. Además, en la mayoría de los casos, el proceso está condicionado por las restricciones espaciales de conectividad y compacidad de las zonas generadas.

La tabla siguiente muestra los principales criterios de zonificación usados en los campos de aplicación descritos anteriormente.



Campos de aplicación tradicionales	Tipos de criterios	
	Espaciales	Temáticos
(1) Distritos políticos o electorales	<i>Integridad</i> (exigido) <i>Conectividad</i> (exigido) <i>Compacidad</i> (recomendable)	<i>Zonas equilibradas</i> en población
(2) Zonas de venta y prestación de servicios	<i>Integridad</i> (exigido) <i>Conectividad</i> (exigido casi siempre) <i>Compacidad</i> (exigido)	<i>Zonas equilibradas</i> respecto a uno o varios atributos (media de ventas...)
(3.1) Zonas receptoras de servicios situados en una posición fija	<i>Integridad</i> (exigido) <i>Conectividad</i> (exigido casi siempre)	<i>Zonas equilibradas</i> en asignación de recursos
(3.2) Zonas de prestación de servicios a domicilio	<i>Integridad</i> (exigido) <i>Conectividad</i> (exigido) <i>Compacidad</i> (exigido)	<i>Zonas equilibradas</i> en prestación de servicios
(3.3) Zonas receptoras de servicios energéticos	<i>Integridad</i> (exigido) <i>Conectividad</i> (recomendable) <i>Compacidad</i> (exigido)	<i>Zonas equilibradas</i> en consumo energético o en fuentes de energía
(3.4) Zonas para la asignación de usos del suelo	<i>Integridad</i> (exigido) <i>Conectividad</i> (recomendable) <i>Compacidad</i> (recomendable)	<i>Zonas equilibradas y eficientes en la explotación de sus recursos</i>
Nuevo campo de aplicación		
(4) Zonas para la explotación/gestión de los recursos existentes	<i>Integridad</i> (exigido) <i>Conectividad</i> (exigido) <i>Compacidad</i> (mínimamente recomendado)	<i>Zonas de diferente tamaño en recursos, ajustadas a necesidades específicas</i>

Tabla 1. Campos de aplicación del diseño de zonas y criterios utilizados en ellos.



5) Aplicaciones relacionadas: Clustering y agregación de datos espaciales

El análisis cluster tiene por objetivo la agrupación de los objetos en clases, de forma que se verifiquen dos condiciones: cada clase estará formada por elementos homogéneos, de características similares, y las diferencias entre clases y, por tanto, entre sus respectivos elementos, serán las mayores posibles.

El nexo común con el diseño de zonas es la agregación de unidades básicas en conjuntos de mayor rango, por lo que ambos procesos pueden caracterizarse por una serie de criterios y restricciones similares. Sea $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ un conjunto de unidades básicas, m el número de zonas y $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ una partición de X , donde z_i es el conjunto de todas las unidades básicas que pertenecen a la zona i . Se verifica que:

$$\begin{aligned} z_j &\neq \emptyset, \forall j = 1 \dots m \\ z_i \cap z_j &= \emptyset, \forall i \neq j \\ \bigcup_{i=1}^m z_i &= X \end{aligned}$$

La mayoría de los problemas de clustering, aún en el caso de que el número de clusters a generar sea constante, son problemas NP-duros (Altman 1997). Desde el punto de vista práctico, esto significa que no es posible encontrar algoritmos eficientes que resuelvan el problema de forma exacta.

Pese a las similitudes descritas, existen diferencias fundamentales entre ambos procesos. En el clustering, el objetivo de la agregación consiste en generar conjuntos internamente homogéneos y diferentes entre sí. En el diseño de zonas se busca la similitud entre dichos conjuntos. Aunque en ambos casos está presente el objetivo de homogeneidad, en el clustering tiene un carácter interno, es decir, se busca entre los elementos de un conjunto, mientras que en el diseño de zonas es de tipo externo, se busca entre los diferentes conjuntos. Además, también existen diferencias metodológicas en los respectivos modelos de solución de ambos problemas, dada la necesidad de considerar, en el diseño de zonas, otras restricciones adicionales como la conectividad o la compacidad.

6) Definición de zonas en otros modelos

La partición de un territorio o espacio geográfico en un conjunto de regiones se presenta también en aplicaciones características de otros problemas o modelos diferentes al de diseño de zonas. A continuación se citan los más importantes:



- Modelos de Localización-Asignación⁵ (Location-Allocation models)

El diseño de un sistema para la distribución de los productos o servicios de una empresa u organismo cualquiera es una de las aplicaciones más usuales de este tipo de modelos. El problema consiste en encontrar la mejor ubicación para los servicios⁶ o instalaciones de la empresa. El proceso realmente consta de dos fases: la selección de los emplazamientos para dichos servicios y la asignación, a los lugares elegidos, de los potenciales clientes o usuarios, teniendo en cuenta su localización y el nivel de demanda del producto o servicio. La selección se realiza en un conjunto de lugares candidatos, cuyo número puede ser muy elevado. En esta fase se tienen en cuenta factores tales como la accesibilidad a redes de transporte, la proximidad y el tamaño de los mercados existentes, la proximidad a otras industrias o negocios, el coste y la disponibilidad de infraestructuras y redes de servicios, etc. Una vez determinada la configuración espacial de los servicios, se procede al reparto o asignación de los puntos de demanda y a la construcción de unas zonas que han de verificar una serie de condiciones (cobertura de demanda, ajuste a los límites de capacidad de servicio de las instalaciones, minimización de costes, maximización de beneficios, etc.).

El diseño de zonas se presenta como un elemento más del modelo, que aparece condicionado por el problema de localización de los servicios y por el flujo o grado de accesibilidad que pueda establecerse con los usuarios, lo que realmente equivale a un problema estándar de transporte. Por lo general, el proceso de selección-localización implica una función de optimización en términos de minimizar o maximizar la distancia total (coste, tiempo...) a los usuarios, la opción elegida depende del tipo de servicios contemplado en la planificación.

Para algunos autores, (Bong et al. 2004; Kalcsics et al. 2005), los problemas que intentan resolver algunos modelos de localización-asignación, como el P-mediana, son problemas muy similares al de diseño de zonas. De hecho, una gran parte de los procedimientos heurísticos desarrollados para resolver estos modelos se han aplicado también al diseño de zonas, por ejemplo: los algoritmos genéticos, las técnicas “tabu search”, “simulated annealing”, etc.

En el trabajo de Ríos-Mercado y Fernández (2009) se presenta una breve revisión de algunos modelos de localización-asignación aplicados a dos problemas de diseño de zonas: la demarcación de territorios de venta (Hess y Samuels 1971; Fleischmann y Paraschis 1988; Kalcsics et al. 2005) y de distritos políticos (Hess et al. 1965, Hojati 1996).

⁵ Modelos de este tipo: P-mediana, P-centro o modelo Minimax, SPLP (Simple Plant Location Problem), UFLP (Uncapacitated Facility Location Problem), APLP (Aggregate Capacity Plant Location Problem), etc.

⁶ Facilities.



- Modelos de planificación de transporte

Los principales objetivos de la planificación tradicional de transporte consisten en identificar los patrones espacio-temporales de los diferentes tipos de viajes, estimar la demanda y oferta de transporte y evaluar los sistemas y redes existentes en el área de estudio. La estimación del flujo de tráfico es un factor de vital importancia para evaluar la eficacia y eficiencia de la oferta de transporte. Para estimar este factor y elaborar el modelo de planificación de transporte de un territorio, el área de estudio se divide en unidades superficiales denominadas zonas de análisis de transporte (TAZs: transport analysis zones).

Un método convencional para estimar el flujo de tráfico en una red (o en un segmento de la red) consta de 4 fases: generación y distribución de viajes, elección del modo de transporte y asignación de viajes (Bandy y Baber, 1992; O'Neill, 1991). Este análisis se realiza a partir de unas zonas de análisis de tráfico predeterminadas. En la generación de viajes se calcula los que salen y llegan a las diferentes zonas, y posteriormente, en la distribución de viajes se obtienen los pares de flujos origen-destino entre dichas zonas, para viajes realizados por motivos diversos y con diferentes modalidades de transporte. Por último, en los modelos de asignación es necesario calcular el número total de viajes interzonales (o demanda) correspondientes a los diferentes segmentos de la red.

Uno de los principales objetivos del diseño de TAZ es proporcionar una descripción precisa de los sistemas de transporte. Por tanto, ha de tenerse en cuenta cualquier criterio que contribuya a lograr esta meta. Los criterios más importantes para definir las zonas de transporte, (Black 1981, Ding et al. 1994, O'Neill 1991), son los siguientes:

- Homogeneidad respecto a las características socio-económicas de las zonas (número de viviendas, nivel de ingresos, etc.). La producción de viajes depende de características demográficas, tales como la tenencia de coches, la renta de los hogares, etc., siendo el empleo el factor clave en la estimación de la atracción de viajes.
- Predominio de un determinado uso de suelo en cada TAZ, a fin de minimizar los viajes intrazonales y maximizar los viajes entre las zonas.
- TAZs conexas, compactas y de similares características espaciales (área, forma...).
- Compatibilidad de los límites de las TAZs con otras unidades administrativas (por ejemplo secciones censales) o con otras infraestructuras lineales (carreteras, ferrocarriles, canales...).
- Etc.



Muchos de los criterios para el diseño de zonas de tráfico suelen coincidir con el de otras aplicaciones analizadas anteriormente. La implementación simultánea de los criterios anteriores resulta bastante compleja, ya que algunas restricciones se contraponen entre sí. Por ejemplo, si sólo se considera el uso de suelo predominante, suele resultar bastante difícil que todas las zonas sean compactas y de forma convexa. Para formar las diferentes zonas requeridas en cada caso, se realiza una agregación espacial de unidades básicas en torno a unas unidades semilla. La elección de estas semillas suele estar condicionada por la intensidad de una cierta propiedad, por ejemplo la densidad de población, de forma que se elegirían las unidades de mayor densidad. Otro factor a tener en cuenta en la selección de semillas es que sus posiciones estén lo más distantes posible en el espacio.

Tal y como se ha descrito, la definición de las TAZs es un requisito del modelo de planificación de transporte, modelo complejo en el que es necesario analizar la red de transporte y las infraestructuras viarias existentes, haciendo un estudio de los posibles movimientos, flujos y viajes reales o potenciales sobre dichas redes. En estos modelos, la definición de las zonas de análisis de tráfico, por agregación de datos espaciales, afecta significativamente a los resultados de la planificación de transporte, por lo que su diseño es un elemento clave del modelo.

Entre los trabajos más relevantes en el diseño de TAZs destacan los de Ding et al. (1994), que crearon una aplicación prototipo ARCTAN que integraba funciones de un Sistema de Información Geográfica con elementos de análisis de planificación de transporte.



2.2 Formalización matemática de los problemas de zonificación: revisión bibliográfica

El diseño de zonas es un proceso que implica la agregación de un conjunto de unidades de área en un número menor de zonas o regiones, que deben cumplir una serie de condiciones espaciales (geográficas) y temáticas. Los criterios que se establecen en las aplicaciones varían considerablemente de una a otra, especialmente las condiciones dependientes del contexto. Por el contrario, existe un conjunto básico de restricciones espaciales presente en la mayoría de ellas. Las condiciones de este tipo utilizadas con más frecuencia son las de integridad, conectividad y compacidad. De hecho, puede afirmarse que la propiedad de conectividad es el criterio espacial prioritario en los problemas de zonificación (Shirabe 2005), por lo que resulta imprescindible la codificación explícita de las relaciones topológicas entre las unidades básicas.

El problema del diseño de zonas ha sido ampliamente investigado desde los años sesenta, por lo que han aparecido varios modelos de solución o formalizaciones matemáticas para sus diferentes aplicaciones. Dado que todos estos modelos tienen como nexo de unión el uso de algoritmos de búsqueda u optimización, el diseño de zonas puede caracterizarse realmente como un problema de optimización combinatoria⁷ (Altman 1997, Guo et al. 2000).

2.2.1 Complejidad del problema

En matemáticas y ciencias de la computación, el término optimización o programación matemática, se refiere a la elección del mejor elemento de un conjunto de alternativas disponibles.

La formulación del problema de diseño de zonas es discreta en tanto en cuanto las regiones se construyen como agregados de piezas indivisibles. Si se dispone de N unidades para generar M regiones, existen del orden de M^N zonificaciones espaciales sin imponer restricciones de tamaño y conectividad a dichas regiones (Williams 2002). Aunque el valor de M sea pequeño, el número de soluciones crece exponencialmente a medida que N aumenta. Cuando las regiones han de ser conexas, no existe una fórmula general que permita determinar el número de posibles zonificaciones, aunque se mantiene su comportamiento exponencial respecto a N . En resumen, el diseño de zonas puede caracterizarse como un problema de optimización discreta.

⁷ La optimización combinatoria se ocupa de problemas en los que el conjunto de soluciones factibles es discreto o puede reducirse a uno discreto.



Los problemas de optimización discreta⁸ se definen por un conjunto finito de candidatos -el *espacio de búsqueda*-, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{|\Omega|}\}$, junto con una *función objetivo* $V: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$. La función objetivo es una medida cuantitativa de la calidad de cada uno de los candidatos, que asigna un valor real a cada elemento en el espacio de búsqueda, es decir, $V(\omega) \in \mathbb{R}, \forall \omega \in \Omega$. Un problema de optimización discreta tiene por meta encontrar candidatos que minimicen o maximicen la función objetivo, definida por uno o varios criterios, según se trate de una función simple o multi-objetivo respectivamente. Si el problema es de minimización, un candidato, $\omega_0 \in \Omega$, que minimiza la función objetivo, $(V(\omega_0) \leq V(\omega), \forall \omega \in \Omega)$, es una solución óptima global⁹. Por tanto, un candidato que minimice (o maximice, según el contexto) la función objetivo es una solución óptima. Generalmente, además de los criterios u objetivos, el conjunto de soluciones -los elementos del espacio S -, han de satisfacer una serie de *restricciones*.

En un problema de diseño de zonas se dispone de un conjunto X de unidades básicas, que han de ser agrupadas en un conjunto menor Z de zonas, de forma que se maximice una función objetivo y se cumplan algunas restricciones como la conectividad y compacidad. Además, una partición o zonificación ha de dividir un conjunto en grupos de componentes que sean exhaustivos y exclusivos. Expresado el problema formalmente:

Sea $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ un conjunto de unidades básicas, m el número de zonas y $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ una partición de X , donde z_i es el conjunto de todas las unidades básicas que pertenecen a la zona i . Se verifica que:

$$z_j \neq \emptyset, \forall j = 1 \dots m$$

$$z_i \cap z_j = \emptyset, \forall i \neq j \text{ y } \bigcup_{i=1}^m z_i = X$$

Si se pretende que todas las zonas tengan el mismo tamaño poblacional, se podría verificar esta condición calculando la suma de las diferencias entre la población de cada una y la población media del conjunto de zonas o partición. La función objetivo $V(Z)$ más sencilla que podría formularse en este problema sería:

$$V(Z) = \sum_{j=1}^m |P_j - \mu|$$

donde P_j representa la población de la zona j y μ la población media de la partición.

⁸ En los problemas de optimización se usa la siguiente nomenclatura:

- *Espacio problema* X : conjunto de todos los elementos x que pueden ser una solución del problema. Una solución candidata x es un elemento del espacio X . Es lo que, en este trabajo, se denomina **espacio de búsqueda** Ω . Los elementos ω de este espacio, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{|\Omega|}\}$, son todos los **candidatos o posibles soluciones del problema**.
- *Espacio solución* S : unión de **todas las soluciones del problema**, que verifica: $S \subseteq X$. En este trabajo $S \subseteq \Omega$.
- *Espacio de búsqueda* G : conjunto de todos los elementos g que pueden ser procesados por las operaciones de búsqueda. Según el tipo de problema de optimización, el espacio de búsqueda G puede ser igual o diferente del espacio problema X . En este último caso, es necesario establecer las equivalencias entre uno y otro. En realidad se trata de un **espacio de búsqueda restringido** Ω' .

Dada la dificultad para diferenciar, en todos los casos, Ω de Ω' , en este trabajo sólo se usará el término Ω .

⁹ Dada una función V definida en un conjunto X :

- un óptimo global es un mínimo (o máximo) en todo el conjunto X ,
- un óptimo local en x es un mínimo (o máximo) en un entorno de un punto $x \in X$.



La zonificación óptima tendría que alcanzar el valor:

$$D^* = \min \sum_{j=1}^m |P_j - \mu| = \min_{Z \subset \Omega} (V(Z))$$

La dificultad para resolver el problema dependerá de la función objetivo en particular y de sus restricciones. Si en el caso anterior se incluyera la restricción de compacidad de las zonas, habría que definir una medida de dicha propiedad e incluirla en la función objetivo. Por ejemplo, se podría usar la “compacidad radial” que, en un conjunto partición, es la suma de las distancias euclídeas entre el centro o semilla de cada zona y los centroides de sus unidades básicas:

$$\text{Compacidad-radial} = \sum_{j=1}^m \sum_{i \in z_j} d_{ij}$$

donde d_{ij} es la distancia entre el centro de z_j y el centroide de x_i .

Una de las formas de incluir esta medida en la función objetivo, podría ser añadirla como un segundo término aditivo: $V(Z) = \sum_{j=1}^m (|P_j - \mu| + \sum_{i \in z_j} d_{ij})$

En este caso, la zonificación óptima tendría que alcanzar el valor:

$$D^* = \min \sum_{j=1}^m (|P_j - \mu| + \sum_{i \in z_j} d_{ij})$$

Cuando en un problema de optimización se plantean diferentes objetivos, existen dos alternativas básicas de solución: considerar uno de ellos como objetivo principal y los demás como restricciones del problema, o bien incluir todos los objetivos en la función a optimizar, como en el ejemplo anterior, donde la igualdad poblacional y la compacidad se tratan como objetivos de la optimización. En este último caso, si es necesario, se pueden asignar pesos a cada objetivo para dar más importancia a alguno de ellos.

El tamaño del espacio de búsqueda Ω en un problema de diseño de zonas puede ser enorme, de forma que el total de candidatos crece exponencialmente a medida que aumenta el número de unidades básicas, tal y como se ha indicado anteriormente. El total de zonificaciones posibles se puede calcular usando el número Stirling de segunda clase (como en el problema de clustering):

$$S(n, m) = \frac{1}{m!} \sum_{i=0}^m (-1)^i \left(\frac{m!}{(m-i)! i!} \right) (m-i)^n$$

siendo n el número de unidades básicas y m el número de zonas (Altman 1997).

El enorme tamaño del espacio Ω convierte la búsqueda de zonificaciones óptimas en un problema de gran complejidad computacional.



La complejidad temporal (o simplemente complejidad) de un algoritmo es una función que representa el número de operaciones elementales que tiene que ejecutar para llegar a la solución. Esta complejidad se expresa en términos del tamaño del problema, que usualmente se mide en términos del número de datos de entrada, n , y se expresa convencionalmente con la notación $O(f(n))$. Se dice que una función $g(n)$ es $O(f(n))$ si existe una constante c , tal que $g(n)$ "es menor o igual que" $c \times f(n)$, para todo n "perteneciente a los naturales". Por tanto, en esta expresión se omiten tanto las constantes aditivas y multiplicativas como los términos de orden menor. Por ejemplo, si el tiempo que necesita un algoritmo, con una entrada de tamaño n , es como máximo de $5n^3 + 3n$, entonces su complejidad temporal es $O(n^3)$.

Dado que la cantidad de operaciones que ejecuta un algoritmo no es la misma para todos los conjuntos de datos del mismo tamaño, habitualmente se utiliza, como medida de la complejidad temporal, el peor de los casos posibles. Se denota por $T(n)$ y representa el máximo intervalo temporal empleado por cualquier conjunto de datos de tamaño n . La complejidad temporal se clasifica en función de $T(n)$. Por ejemplo, un algoritmo con $T(n) = O(n)$ es un algoritmo de tiempo lineal, y uno con $T(n) = O(2^n)$ se dice que es un algoritmo de tiempo exponencial. Un algoritmo es de tiempo polinómico si su tiempo de ejecución está acotado superiormente por un polinomio en el número de datos de entrada, por ejemplo, $T(n) = O(n^k)$ para una cierta constante k . Si la función de complejidad temporal de un algoritmo no está acotada por un polinomio, entonces se dice que el algoritmo es de tiempo exponencial.

Un problema se considera "computacionalmente tratable" (clase P), si existe un algoritmo de complejidad polinómica que lo resuelve. En este caso, el tiempo polinómico es sinónimo de rápido, eficiente, viable, etc.

Un problema se considera "computacionalmente intratable" (clase NP) o computacionalmente complejo, si el algoritmo óptimo para resolverlo no puede solucionar todas sus instancias en un tiempo polinómico. Existe una familia de problemas de decisión¹⁰, los NP-completos, con las siguientes características: no se conoce ningún algoritmo polinómico que los resuelva y, además, son todos equivalentes, en el sentido de que si se encuentra un algoritmo polinómico para resolver alguno de ellos, el resto pueden transformarse en éste, de forma que todos se podrían resolver en tiempo polinómico. Quizá el problema NP-completo más conocido sea el del viajante: dada una distancia d y un conjunto de n ciudades, se trata de determinar si existe una ruta que recorra las n ciudades con una distancia total menor que d . Un problema es NP-duro (NP-hard) si, de existir un algoritmo A , de tiempo polinómico, que lo resolviera, dicho algoritmo podría utilizarse para resolver, también en tiempo polinómico, todos los problemas NP-completos. Aunque no se ha demostrado que esto sea así, la creencia general, conocida como conjetura de Cook, es que no puede existir dicho algoritmo de tiempo polinómico.

El problema de diseño de zonas pertenece a la segunda categoría (Altman 1997). Sin embargo, al igual que otros problemas computacionalmente complejos, se pueden resolver de

¹⁰ Un problema es de decisión si las posibles soluciones son "Sí" o "No".



forma aproximada con más rapidez. A efectos prácticos, si la aproximación conseguida está lo suficientemente cerca de la solución óptima del problema, puede que no sea necesario encontrar la solución exacta.

Todo problema puede convertirse en trivial añadiendo un número suficiente de restricciones. Por lo que si se limitan adecuadamente los datos de entrada y las restricciones impuestas al diseño de zonas, se reducirá el número de soluciones que el algoritmo ha de considerar, y el problema pasará a ser del tipo tratable. Existen tres tipos básicos de limitaciones que pueden aplicarse a nuestro caso. En primer lugar, se pueden restringir los objetivos de la zonificación. En segundo lugar, reducir las zonificaciones de salida descartando algunas de ellas, por ejemplo, las que contengan recintos no conexos. Por último, se pueden limitar los datos de entrada, imponiendo determinadas condiciones a las unidades básicas que intervienen en el proceso, por ejemplo, que todas tengan el mismo tamaño.

En resumen, el diseño de zonas puede caracterizarse como un problema de optimización combinatoria que admite varios modelos o formalizaciones matemáticas (Altman 1997). Para automatizar este proceso, independientemente del modelo elegido, se pueden emplear diferentes técnicas de optimización, ya sean exactas o heurísticas, para realizar la búsqueda de soluciones óptimas o casi-óptimas respectivamente. Con relación a estas técnicas, se puede constatar el abandono de los métodos exactos en favor de los heurísticos, que han sido utilizados fundamentalmente desde 1995, aunque actualmente están empezando a ser desplazados por metaheurísticas (Guo et al. 2000).

2.2.1.1 Técnicas heurísticas de optimización

Una heurística es cualquier método que se considera útil en la resolución de un problema para el que no puede garantizar una solución óptima (o aproximadamente óptima). En el contexto de los problemas de optimización, una heurística puede definirse como una función que ayuda a decidir qué solución, del conjunto de soluciones posibles, tiene que ser analizada en cada momento (Weise 2009). Los algoritmos que utilizan heurísticas sólo procesan los elementos del *espacio de búsqueda* Ω ¹¹ que han sido previamente seleccionados por estas funciones. Por extensión, dichos algoritmos también pueden denominarse heurísticos.

¹¹ Al describir las heurísticas usadas en los problemas de optimización, se usa el término espacio de búsqueda restringido para hacer referencia a los elementos que pueden ser procesados por dichos algoritmos. En la mayoría de los casos, este espacio coincide con el espacio de búsqueda, en el que se encuentra el espacio solución. Para simplificar, en este texto sólo se utilizarán las expresiones:

- *Espacio de búsqueda (conjunto de soluciones candidatas), equivalente al espacio de búsqueda restringido al que se hace referencia en la literatura sobre heurísticas.*
- *Espacio solución (conjunto de las soluciones del problema).*



Las metaheurísticas son técnicas que pretenden resolver problemas de propósito general para los que no existen algoritmos satisfactorios o plenamente eficientes. Se basan fundamentalmente en combinar diversas técnicas heurísticas a fin de encontrar un procedimiento de solución más eficiente y robusto (Yagiura e Ibaraki 2000). Cuando estos métodos se utilizan para buscar una solución óptima en un espacio de búsqueda discreto, como el de los problemas de diseño de zonas, su característica más relevante es que permiten tratar casos donde el espacio de soluciones candidatas Ω puede ser de gran tamaño, mostrando su capacidad para proporcionar soluciones aceptablemente buenas, no necesariamente óptimas, en un tiempo razonable.

En definitiva, la aplicación de estos métodos al diseño de zonas permite reducir el conjunto de zonificaciones candidatas a analizar. Las técnicas que más se han utilizado para la búsqueda de soluciones buenas o casi-óptimas, en este y en otros problemas de partición, son las siguientes:

- **Búsqueda en escalada (hill climbing)** -heurística-. Es una de las técnicas más antiguas y sencillas diseñadas, originalmente, para funciones simples (de un único objetivo). Consiste en generar una solución aleatoria inicial a la que se va aplicando, de forma iterativa, pequeños cambios que suponen una mejora progresiva. El proceso se compone de un bucle en el que la solución candidata actual se usa para producir una nueva, que sólo sustituirá a la existente en caso de ser mejor. El bucle se inicializa cada vez que se produce una sustitución. El algoritmo termina cuando no se consigue ningún tipo de mejora. El mayor problema de “hill climbing” es que puede converger rápidamente, quedando atrapado con facilidad en un óptimo local. Idealmente, la solución alcanzada en ese momento está próxima a la óptima, pero no se garantiza dicha proximidad ni tan siquiera que pueda conseguirse (Horn 1995).

- **Recocido simulado (simulated annealing)** -metaheurística-. Es un algoritmo heurístico de búsqueda que tiende a encontrar, con un elevado nivel de confianza, una buena aproximación al óptimo (mínimo) global de una determinada función en un espacio de búsqueda de grandes dimensiones. Se suele usar cuando este espacio es discreto, como en el problema de diseño de zonas.

El nombre de este algoritmo proviene del proceso metalúrgico “annealing”, una técnica que implica el calentamiento y enfriamiento controlado de un material, con el objetivo de minimizar sus defectos. El calentamiento provoca que los átomos se separen de sus posiciones iniciales (un mínimo local de la energía interna) y pasen aleatoriamente a través de estados de mayor energía. Un enfriamiento lento proporciona a los átomos más oportunidades de encontrar configuraciones de menor energía interna que el estado inicial. Por analogía con este proceso físico, cada punto ω del espacio de búsqueda corresponde a un estado de un cierto sistema físico, y la función a minimizar $V(\omega)$, a la energía interna del sistema en dicho estado. El objetivo es que el sistema pase de un estado arbitrario inicial a



otro con la mínima energía posible. En cada fase del algoritmo se reemplaza el estado actual ω por otro aleatorio ω' muy próximo, que se acepta con una cierta probabilidad. Esta probabilidad depende de la diferencia entre los valores de la función para los estados considerados ($V(\omega)$ y $V(\omega')$), y de un parámetro global T -llamado temperatura- que va disminuyendo gradualmente durante el proceso. Cuando T es grande, la probabilidad de pasar de un estado a otro, casi aleatorio, es muy alta, pero va disminuyendo cada vez más conforme T tiende a cero. Formalmente, la aceptación de cambios está determinada por la función de probabilidad $P(e, e', T)$, donde $e = V(\omega)$ y $e' = V(\omega')$ corresponden a los valores de la energía de los estados ω y ω' , y T es el parámetro temperatura. Esta función nunca puede tomar un valor nulo, ni siquiera cuando $e' > e$, lo que significa que el sistema puede pasar a un estado peor que el actual (de mayor energía). Por otra parte, cuando T se aproxima a cero, la probabilidad P debe tender a cero. De esta forma, para valores de T suficientemente pequeños, el sistema será cada vez más proclive a cambios que minimicen el nivel de energía, y evitará los que la aumenten.

La simulación del proceso físico puede usarse para describir la generación progresiva del espacio solución en un problema de optimización combinatoria. Tal y como se ha descrito anteriormente, las soluciones se pueden considerar equivalentes a los estados de un sistema físico y el costo de cada solución, o valor de la función objetivo, equivalente a la energía de un estado. En la formalización matemática del problema se introduce un parámetro de control (C) que juega el papel de la temperatura. En el proceso de transición entre dos estados, se aplica un criterio de aceptación para sustituir la solución actual por otra aleatoria. Conforme a este criterio no sólo se aceptan las soluciones que disminuyen y, por tanto, mejoran el costo, sino también otras que lo empeoran. La aceptación de soluciones se realiza con una cierta probabilidad que va cambiando en función del parámetro de control. Inicialmente, para valores grandes de C , es posible aceptar soluciones con un valor de costo mucho mayor que el actual. Al ir decreciendo este parámetro, únicamente se aceptarán las soluciones que supongan unas variaciones de costo mínimas. Finalmente, cuando el valor de C se aproxime a cero, la probabilidad de aceptar cambios adversos es prácticamente nula. Si sólo se aceptaran cambios que mejoraran la función objetivo, el procedimiento de búsqueda podría quedarse atrapado en un óptimo (mínimo) local. La posibilidad de aceptar movimientos que conlleven, a corto plazo, un deterioro de la función objetivo, permite escapar de los óptimos locales en el espacio solución y encontrar, con un elevado nivel de confianza, soluciones más próximas al óptimo global.

El uso de “simulated annealing” para encontrar óptimos globales, en problemas de diseño de zonas, fue sugerido la primera vez por Bowdry (1990). Con el tiempo se demostró que, sin el uso de un algoritmo eficiente para comprobar la conectividad, su eficacia sólo era aceptable en problemas de tamaño reducido. De todas las técnicas heurísticas de búsqueda, este algoritmo es uno de los más conocidos y utilizados en los diferentes modelos de solución.



Entre los autores que han aplicado esta técnica a problemas de diseño de zonas cabe destacar a: Opensaw y Rao (1995), Ricca y Simeone (1997), Macmillan (2001), Aerts y Heuvelink (2002), Alvanides et al. (2002), D’Amico et al. (2002) y Boyland et al. (2004).

• **Búsqueda tabú (tabu search)** -metaheurística-. Es un procedimiento de búsqueda local basado en movimientos iterativos, de un elemento candidato ω a otro ω' situado en su vecindad ($N^*(\omega)$), hasta que se cumple algún criterio de parada. Para explorar el espacio de búsqueda, este algoritmo modifica el conjunto vecindad de cada candidato ω según avanza el proceso. La nueva vecindad, es decir, el conjunto de candidatos admitidos para $N^*(\omega)$, se determinan mediante el uso de ciertas estructuras de memoria, como por ejemplo la lista tabú. En una estructura de este tipo se almacenan los p candidatos que se han visitado recientemente -en las últimas q iteraciones realizadas por el algoritmo ($q \leq p$)-. El proceso de búsqueda progresa moviéndose de forma iterativa de un candidato ω a otro ω' en $N^*(\omega)$. Cuando se encuentra una posible solución (o solución candidata) se marca como “tabú” y se guarda en la lista, para que el algoritmo no vuelva a visitar dicha solución y se evite la aparición de ciclos. En la lista tabú se almacenan todas las soluciones candidatas que ya han sido analizadas y deben excluirse de $N^*(\omega)$. Dado que esta estructura no puede crecer infinitamente, su tamaño está limitado a un valor máximo p . Cuando se añade la solución candidata $p+1$, se elimina la primera almacenada en la lista.

Entre los autores que han aplicado este tipo de heurística a problemas de diseño de zonas, cabe destacar a: Glover (1977, 1986), Opensaw y Rao (1995), Glover y Laguna (1997) y Bozkaya et al.¹² (2003).

• **GRASP** (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) -metaheurística-. Es un algoritmo muy utilizado para resolver problemas de optimización combinatoria. Los métodos heurísticos citados anteriormente son más sofisticados y mejores que las versiones básicas de este algoritmo, pero también es cierto que requieren unas estructuras de datos más complejas y un mayor esfuerzo computacional. GRASP consiste básicamente en un proceso iterativo en el que cada iteración consta de dos fases: construcción y post-proceso. En la primera fase se construye una solución viable o candidata y, en la segunda, se le aplican reiteradas mejoras mediante un procedimiento de optimización local. Esta optimización tiene por finalidad mejorar el valor de la función objetivo y es el proceso que supone la mayor carga computacional.

Este algoritmo ha sido utilizado en problemas de diseño de zonas, si bien su aplicación no está tan extendida como las heurísticas anteriores. En esta línea de investigación caben citar los trabajos de Vargas-Suárez et al. (2005) y Ríos-Mercado y Fernández (2009).

¹² Estos autores aplicaron el algoritmo diseñado a un caso real en Edmonton, Canadá, con 828 unidades básicas para definir 19 distritos.



• **Algoritmos genéticos (GA)** -metaheurística-. Son un tipo de algoritmos evolutivos que permiten encontrar soluciones aproximadas a problemas de optimización. Usan técnicas que imitan los procesos de evolución biológica, procesos similares a la fusión, mutación y selección evolutiva, con un ciclo de mutaciones aleatorias que dan paso a generaciones sucesivas de “soluciones”. Su idea básica es mantener una población de cromosomas, es decir, soluciones candidatas a un problema concreto, que evolucionan con el tiempo a través de un proceso de competición y variación controlada.

Un algoritmo genérico de este tipo necesita definir dos elementos básicos: una representación genética del espacio de búsqueda (por ejemplo: un array de bits, un estructura de grafo, etc.), y una función de ajuste para evaluar dicho espacio. Esta función se define sobre la representación genética, sirve para medir la calidad de la solución y es dependiente del problema.

Una vez que se han definido los elementos anteriores, el algoritmo genera aleatoriamente una población inicial de soluciones candidatas, que irá mejorando progresivamente mediante la aplicación reiterada de operadores de mutación, cruce, inversión y selección. A lo largo del proceso se van creando sucesivas generaciones de soluciones candidatas. En cada fase se selecciona una parte de la población existente, es decir, un determinado conjunto de candidatos que actuará como núcleo o semilla de la siguiente generación. En este proceso se aplica la función de ajuste que prima, según sus criterios, a las soluciones “mejores” o más adecuadas, ya que éstas tienen más probabilidad de ser seleccionadas. La mayoría de las funciones de ajuste son aleatorias y se diseñan de modo que minimicen la selección de soluciones poco adecuadas. De esta forma se conserva una gran diversidad en la población, evitando rápidas convergencias en soluciones poco buenas.

La aplicación de operadores genéticos (cruce o recombinación y/o mutación) al conjunto seleccionado, da lugar a una nueva población de soluciones candidatas que es diferente de la población inicial. El proceso generacional se repite hasta llegar al número máximo de generaciones o hasta que se cumple una condición de parada.

Este tipo de algoritmos ha sido muy utilizado en procedimientos de búsqueda en problemas del tipo P-mediana, análisis cluster y partición de grafos. En la última década también se ha aplicado a la resolución de problemas de diseño de zonas, como los trabajos de demarcación de distritos políticos de Forman y Yue (2003), Bergey et al. (2003) y Bação et al.¹³ (2005).

La aplicación de técnicas heurísticas permite la generación de soluciones en un tiempo razonable. Sin embargo, la mayoría de las heurísticas utilizadas hasta la fecha tienen un elevado coste computacional y, a menudo, la calidad de sus soluciones es cuestionable, ya que no pueden garantizar matemáticamente la mejor solución ni determinar la desviación respecto a ésta.

¹³ Los autores han aplicado su método de solución en Portugal para definir 93 distritos políticos en todo el país. En la región de Lisboa se establecieron 7 distritos a partir de 33 unidades de población.



Además, estas técnicas suelen depender del contexto, de forma que las soluciones que proporcionan están influenciadas por las condiciones iniciales consideradas. El otro gran inconveniente de la aplicación de heurísticas en los modelos de solución del diseño de zonas, es que su eficacia parece limitarse a problemas de reducido tamaño (conjunto mínimo de unidades básicas o número limitado de regiones) o a casos con un mayor número de restricciones, por ejemplo los que tienen predeterminados los núcleos o centros de las regiones.

Por último, para completar la relación de los algoritmos más utilizados en los modelos de solución, se cita un método determinista cuyo objetivo es encontrar las mejores soluciones en diversos problemas de optimización.

- **“Branch and Bound” (Ramificación y Acotación).** Es un algoritmo general para buscar soluciones óptimas. Se basa en una enumeración sistemática de todos los elementos del espacio de búsqueda, descartando masivamente grupos de candidatos poco adecuados o con bajo nivel de aceptación, de forma que se reduce el tamaño de dicho espacio. Para esta tarea, se utilizan unos límites inferior y superior que se estiman a partir del valor de la función a optimizar.

Por ejemplo, sea un problema cuyo objetivo es encontrar el mínimo valor de una función $V(\omega)$, donde ω pertenece al conjunto Ω de candidatos (espacio de búsqueda). El método branch-and-bound se compone de dos procedimientos. El primero, denominado “branching”¹⁴ (ramificación), consiste en una división tal que, dado un conjunto Ω de candidatos, se generan dos o más conjuntos de menor tamaño $\Omega_1 \dots, \Omega_k$ que verifican $\bigcup_{i=1}^k \Omega_i = \Omega$. El mínimo de $V(\omega)$ en Ω es el mínimo de $\{\omega_1, \omega_2, \dots\}$, donde cada ω_i es el mínimo de $V(\omega)$ en Ω_i . El segundo procedimiento, denominado “bounding” (acotación), calcula los límites inferior y superior correspondientes al mínimo valor de $V(\omega)$ en un cierto subconjunto Ω_i .

La clave de este algoritmo es la siguiente: si el límite inferior de un subconjunto de candidatos Ω_i es mayor que el superior de otro subconjunto Ω_k , entonces, se puede descartar Ω_i de la búsqueda. Este paso se denomina “pruning” (poda), y se suele implementar utilizando una variable global h , en la que se almacena el mínimo valor de los límites superiores correspondientes a los subconjuntos examinados hasta el momento. Cualquier subconjunto que tenga un límite inferior mayor que h puede ser descartado del proceso.

El algoritmo se aplica recursivamente hasta que se encuentra la solución óptima, es decir, cuando el actual conjunto de candidatos Ω se ha reducido a un único elemento, o bien cuando sus límites inferior y superior coinciden. En otro caso, cualquier elemento de Ω será un mínimo de la función en Ω . Finalmente, la mejor solución encontrada durante el proceso se considera un óptimo global.

¹⁴ La aplicación recursiva del procedimiento “branching” define una estructura de árbol, cuyos nodos son los diferentes subconjuntos de S .



Una de las últimas aplicaciones de este algoritmo, en un modelo de programación entera mixta, se encuentra en el trabajo de Solís et al. (2009).

2.2.2 Modelizaciones del problema

El problema del diseño de zonas ha sido ampliamente investigado desde los años sesenta, por lo que han aparecido varios modelos de solución para sus diferentes campos de aplicación. Dadas las características de este problema, en la mayoría de los modelos se han utilizado diversas técnicas de optimización, con el objetivo de buscar la mejor o, simplemente, una zonificación satisfactoria de entre todas las soluciones posibles. Por este motivo, el diseño de zonas se puede caracterizar como un problema de optimización combinatoria que admite varias formalizaciones matemáticas. En cualquiera de los modelos definidos, se plantea la búsqueda de las soluciones que minimicen o maximicen una determinada función objetivo ($V(Z)$) y cumplan algunas restricciones. De hecho, las investigaciones llevadas a cabo desde 1995 hasta el año 2003 resuelven el problema del diseño de zonas generando una única solución, denominada solución óptima, en referencia a la función objetivo definida en su correspondiente modelo (Bong et al. 2004).

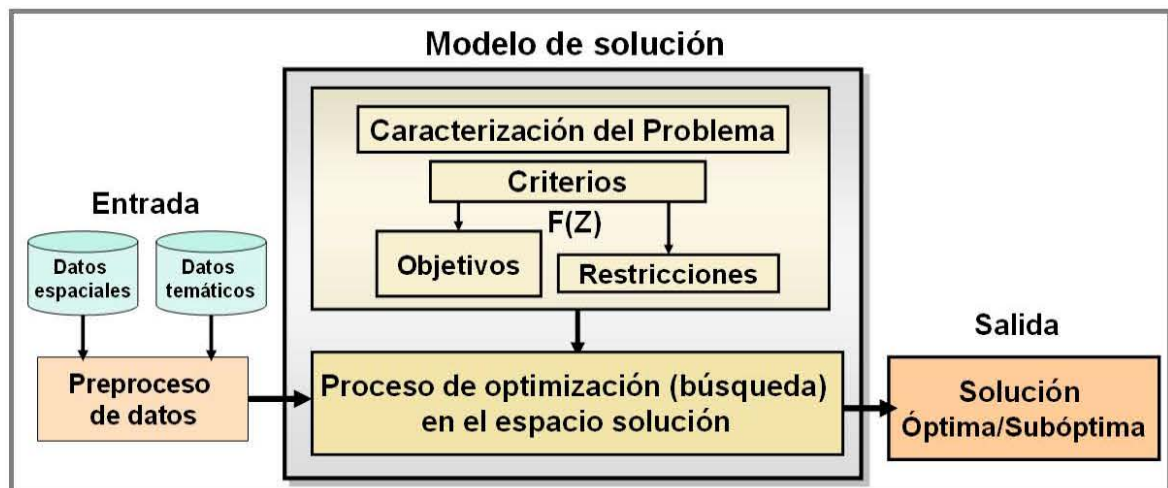


Figura 2. Fases y componentes de un proceso de diseño de zonas.

La dificultad para resolver el problema dependerá de la función objetivo en particular y de las restricciones consideradas en cada caso.

Los criterios que se establecen en las aplicaciones para el diseño de zonas varían considerablemente de una a otra, especialmente las condiciones dependientes del contexto. No obstante, pueden establecerse una serie de elementos que comparten la mayoría de los modelos de solución, y que se basan en los criterios espaciales y temáticos comunes a dichas aplicaciones. En la tabla siguiente se cita la terminología básica utilizada en los modelos y se describen estos criterios, la mayoría de los cuales aparecen en el texto de Kalsics et al. (2005).



Terminología	Descripción
Nomenclatura	<p>Una posible nomenclatura a utilizar en estos modelos es la siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unidades básicas: Sea X el conjunto de unidades básicas $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, donde x_j es la unidad j-ésima. - Zonas (o regiones): Sea z_i la zona o región i-ésima. Una zona es un subconjunto de unidades básicas $z_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}\}$ - Número de zonas: m - Zonificación (o plan): Sea Z_p una zonificación determinada. Una zonificación es una partición de X en un conjunto de zonas: $Z_p = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$
Unidades básicas (o áreas básicas)	<p>Las regiones o zonas se construyen como agregados de bloques o piezas indivisibles denominadas unidades básicas.</p> <p>Estas unidades son objetos en el plano: puntos (direcciones geocodificadas), líneas (vías) o áreas geográficas (códigos postales, parcelas catastrales, unidades administrativas...). El tipo de unidad básica más frecuente corresponde a un objeto de área.</p> <p>Cada una de estas unidades suele llevar asociado uno o varios <i>atributos cuantitativos</i>, denominados medidas de actividad “activity measure” (p.e.: potencial de ventas, número de habitantes...). En la mayoría de los casos se utiliza un único atributo de medida que sirve para calcular el tamaño de las zonas.</p> <p>El tamaño de una zona equivale al total del atributo de medida de las unidades básicas que contiene. Formalmente, sea $a(z_i)$ el tamaño de la zona i, y a_j el valor del atributo de medida correspondiente a la unidad j, entonces:</p> $a(z_i) = \sum_{j \in z_i} a_j$
Centros (núcleos, generadores o semillas) de zonas	<p>Generalmente se asocia un punto representativo a cada zona, que puede ser una localización específica o simplemente su centro geográfico. La mayoría de las veces este punto coincide con el centroide de una de las unidades básicas de la zona.</p> <p>Estos centros pueden ser puntos fijos, predeterminados de antemano, o bien pueden establecerse aleatoriamente durante el proceso de zonificación. Sea $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, donde p_j es el centro o generador j-ésimo.</p>
Número de zonas	<p>El número de zonas o regiones (m) suele ser un valor predeterminado, si bien, en algunos casos, puede ser un parámetro del proceso. Si n es el número de unidades básicas, se ha de verificar $m < n$.</p>
Criterios	Descripción
Objetivo de la zonificación	<p>El objetivo de un proceso de zonificación o diseño de zonas, puede describirse como la partición de un conjunto X de unidades básicas en un número m de zonas que satisfagan unos determinados criterios, espaciales y temáticos, tales como homogeneidad respecto al valor de uno o varios atributos, conectividad y compacidad.</p>

Tabla 2. Terminología y resumen de los criterios más comunes en las aplicaciones de diseño de zonas (I).



Criterios	Descripción
Integridad espacial (asignación única de unidades básicas a zonas)	<p>La condición de integridad se refiere a que <i>cada unidad espacial básica ha de ser asignada a una única zona, es decir, sólo podrá estar contenida en una de las regiones.</i></p> <p>Las zonas definen un recubrimiento exhaustivo y exclusivo del territorio o espacio geográfico a dividir, es decir, <i>las zonas definen una partición del conjunto X de unidades básicas.</i></p> <p>Sea X el conjunto de unidades básicas, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; m el número de zonas y z_i el conjunto de todas las unidades básicas que pertenecen a la zona i. Se verifica que:</p> $z_i \neq \emptyset, \forall i = 1 \dots m, z_i \cap z_j = \emptyset, \forall i \neq j, \bigcup_{i=1}^m z_i = X$
Conectividad	<p>Una zona o región tiene la propiedad de conectividad si es un recinto conexo. Un recinto es conexo si, entre dos cualesquiera de sus puntos, existe un camino totalmente incluido en él.</p> <p><i>Una zona se construirá a partir de un conjunto de unidades espaciales geográficamente conectadas.</i></p> <p>Para generar zonas conexas se necesita <i>información explícita sobre las relaciones de vecindad entre las unidades básicas.</i></p>
Compacidad	<p>La mayoría de las aplicaciones estudiadas tienen por objetivo la creación de zonas lo más compactas posible.</p> <p><i>Un recinto puede considerarse compacto si tiene una forma próxima a la de un círculo o un cuadrado.</i></p> <p>Se pueden utilizar varios métodos para garantizar esta propiedad. Uno de los más utilizados consiste en minimizar la distancia total ponderada entre el centro de la zona y sus respectivas unidades básicas¹⁵:</p> $\sum_{i=1}^m \sum_{j \in z_i} w_i d_{ij},$ <p>donde d_{ij} es la distancia entre el centro i y la unidad j y w_i es el peso del centro i. Generalmente el criterio de compacidad se introduce como un objetivo dentro de la función a optimizar y no como una restricción. De este modo su tratamiento resulta mucho más sencillo.</p>
Homogeneidad (equilibrio o balance)	<p>Todas las zonas deberían presentar <i>tamaños similares</i> respecto al atributo(s) considerado como medida de la actividad.</p> <p>Se dice que una zona z_i es homogénea si su tamaño $a(z_i)$ es igual al valor medio $\mu = a(X)/m$. Ante la práctica imposibilidad de generar zonas totalmente similares, se suele medir el porcentaje relativo de desviación de cada zona con respecto al tamaño medio. A mayor desviación, peor es el nivel de homogeneidad conseguido.</p>

Tabla 3. Terminología y resumen de los criterios más comunes en las aplicaciones de diseño de zonas (II).

¹⁵ Cox (1973) define esta propiedad como “la forma que maximiza, en la zona o recinto, la proximidad de unas localizaciones a otras respecto de su proximidad a localizaciones fuera del recinto”.



Una vez que se establecen los criterios correspondientes a cada aplicación, siempre existe la posibilidad de tratarlos como si fueran restricciones o bien incluirlos en la función a optimizar. Las restricciones suponen un conjunto de limitaciones al espacio de soluciones candidatas (Ω). De hecho, determinan el conjunto de soluciones o alternativas factibles, y se usan para eliminar los candidatos cuyas características no verifican las condiciones impuestas. Tal y como puede observarse en la tabla anterior, la mayoría de estos criterios tienen que ver con la forma (compacidad) y las relaciones espaciales (integridad y conectividad) entre las unidades básicas del territorio, por lo que resulta imprescindible la codificación explícita de las relaciones topológicas entre dichas unidades.

El diseño de zonas puede caracterizarse genéricamente como un problema de optimización combinatoria, que puede formalizarse con diferentes modelos matemáticos en los que se utilizan diversas técnicas heurísticas.

El modelo más simple consiste en considerar el problema como una partición de conjuntos (Mehrotra et al. 1998, Nygreen 1988). Otras posibilidades son el análisis cluster, la partición de grafos y la programación matemática (lineal, entera o entera mixta). A continuación se describen los modelos más utilizados en problemas de diseño de zonas de carácter discreto.

2.2.2.1 Modelos de programación matemática

Un modelo matemático que implica la asignación eficiente de recursos limitados, tales como dinero, material, tiempo y espacio, se denomina modelo de programación matemática. Para definir un modelo de programación matemática es preciso establecer la función objetivo a optimizar y las restricciones que se deben verificar, de tal manera que la solución del modelo permita obtener el valor óptimo del problema original. Cuando el modelo usa solamente funciones lineales, o bien optimiza una función objetivo lineal sujeta a restricciones de igualdad o desigualdad lineal, se le conoce por el nombre de modelo de programación lineal. Además, si todas las variables desconocidas han de ser enteros, el modelo se denomina de programación entera (IP) o programación lineal entera (ILP). Si sólo algunas de estas variables han de ser de tipo entero, se denomina modelo de programación entera mixta (MIP).

Una de las ventajas de usar programación matemática radica en la separación de la solución frente a la formulación. Una vez que el problema está expresado en un formato adecuado, se espera que sea resuelto por algoritmos de optimización o heurísticos.

Openshaw (1977, 1978, 1984) fue pionero en considerar el diseño de zonas como un tipo de problema de optimización combinatoria constreñido, no lineal y entero, en el que el parámetro



a optimizar era la clasificación de N unidades en M zonas ($M < N$). El problema se formaliza mediante un modelo de programación no lineal en el que se define una función objetivo y una función de penalización, para tratar las restricciones, al tiempo que se aplican diversas técnicas heurísticas. Este autor diseñó el algoritmo AZP (Automated Zoning Procedure), que puede calificarse como una técnica de optimización local de límites. Este algoritmo, en su versión original o con modificaciones, ha sido implementado en varias aplicaciones automáticas: AZP, ZDES, AZM y A2Z.

Otros autores han aplicado *modelos de programación entera*, aunque con escaso éxito, para solucionar problemas de zonificación (El-Farzi y Mitra 1992; Macmillan y Pierce 1992), u otros similares como los problemas MLUA -Multi-site Land-Use Allocation¹⁶- (Aerts et al. 2003).

La mayor dificultad en este tipo de modelos reside en formalizar explícitamente la condición de conectividad en términos algebraicos. En esta línea de investigación se han desarrollado varios *modelos de programación entera mixta (MIP)*, en los que tanto las restricciones como la función objetivo son ecuaciones lineales, y sólo algunas de las variables de decisión son enteras. A continuación se citan varios modelos MIP propuestos en diferentes investigaciones, que tienen como nexo común la utilización de un grafo¹⁷ para la representación de las unidades básicas:

- Zoltners y Sinha (1983), en aplicaciones de diseño de zonas de ventas, formularon la condición de conectividad utilizando lo que ellos denominaron “árboles de adyacencia jerárquica”. En su modelo había que seleccionar inicialmente las unidades básicas que iban a servir como centros o núcleos de las regiones de ventas. En primer lugar se construía el grafo del territorio, en el que los nodos representan las unidades básicas (SCUs) y las aristas conectan las unidades que son adyacentes a través de una red de carreteras. Con este grafo se calculaba el tiempo más corto de viaje entre el centro de cada región y el resto de las unidades. A partir de los caminos obtenidos, se reconstruía el grafo con los centros como nodos superiores, formándose un árbol jerárquico de unidades adyacentes por cada uno de ellos. El crecimiento de cada región se hacía a partir de su núcleo, agregando las unidades más próximas a éste. La proximidad se definía en el árbol, en función de la longitud del camino recorrido. Cada región se formaba por el conjunto de los caminos más cortos desde el núcleo a las otras unidades básicas (según el caso, se podían incluir los segundos caminos más cortos, los terceros, etc.). Para resolver este modelo se utilizó una relajación de Lagrange (*Lagrangian relaxation*) y una técnica de optimización de subgradiente.

¹⁶ Asignación de diferentes usos de suelo a los terrenos (o parcelas) de un espacio geográfico (*allocation of multiple sites of different land uses to an area*).

¹⁷ Grafo: un par ordenado (V, A) , donde V es un conjunto de elementos denominados vértices (o nodos) y A es un conjunto de pares de elementos de V , denominadas aristas. Informalmente, un grafo es un conjunto de vértices asociado a un conjunto de aristas que unen dichos vértices. Al modelar el territorio mediante un grafo, los vértices representan a las unidades básicas y las aristas representan las adyacencias entre ellas.



- Cova y Church (2000), para aplicaciones de asignación de usos de suelo (land use allocation) o adquisición de terrenos (land acquisition), propusieron una formalización de la conectividad mediante un conjunto de restricciones en formato MIP. El modelo inicial permitía delimitar una única región compacta y contigua. Tras una serie de modificaciones, el modelo final, poco eficiente, demostró que era posible una formulación MIP de la conectividad a partir de un núcleo predeterminado, es decir, a partir de la selección de una unidad básica que actuara como raíz (“root”) o semilla generadora de dicha región. La heurística aplicada era bastante semejante a la propuesta por Zoltners y Sinha.
- Williams (2002)¹⁸, para aplicaciones de adquisición de terreno y asignación de usos del suelo, modeló la condición de conectividad en formato MIP, considerando tanto un grafo primal de un conjunto dado de unidades básicas como su correspondiente grafo dual. La búsqueda se realizaba simultáneamente en los árboles generadores (“spanning trees”) de los dos grafos, cortando el primal para obtener un sub-árbol de un determinado tamaño y formado por unidades conexas. La implementación del modelo adolece de problemas computacionales cuando el conjunto de datos contiene más de 100 unidades básicas.

Los modelos MIP descritos se caracterizan, desde el punto de vista computacional, por ser eficientes sólo en problemas de pequeño tamaño con un número reducido de unidades básicas, por ejemplo: 100 celdas raster o 179 parcelas irregulares (Shirabe 2005).

- Shirabe (2005), continúa representando con un grafo las unidades básicas, pero al formular la restricción de conectividad en términos de funciones lineales, se basa en la teoría de flujo de redes en vez de usar los caminos más cortos o los grafos duales. El autor propone un modelo MIP que proporciona soluciones óptimas para problemas de menos de 200 unidades, en los que sólo hay que generar una región conexa que cumpla ciertos criterios. En problemas de mayor tamaño aumenta la complejidad computacional, por lo que es necesario usar heurísticas para obtener soluciones aproximadas. En cualquier caso, el problema se hace más tratable, reduciendo en parte su complejidad, si existe un conjunto predeterminado de núcleos o si se fija el número de unidades que han de utilizarse para formar las regiones.

¹⁸ En un trabajo anterior este autor representaba el territorio como un grafo planar con vértices y aristas, $G(V,A)$, que se construye en el plano cartesiano de forma que dos aristas sólo pueden intersectarse en un vértice. Los vértices representan las unidades básicas, y las aristas representan las adyacencias entre ellas. Los grafos planares tienen grafos duales. Las aristas y vértices de un grafo planar (el grafo “primal”) dividen el plano en un conjunto de R zonas, todas las cuáles, excepto una, están perfectamente delimitadas y constituyen recintos cerrados. El grafo dual se construye colocando un vértice dual dentro de cada una de las zonas, incluyendo también la zona no delimitada. Para cada arista en el grafo primal, se dibuja una arista dual que une los dos vértices duales separados por la arista primal. El dual de un grafo planar es también un grafo planar. Las aristas de los grafos primal y dual se intersecan por pares, una arista primal con una dual.



- Solís et al. (2009) aplican un modelo de programación entera mixta a un problema de diseño de zonas de atención comercial y distribución de los productos de una empresa. Para resolver el problema se ha trabajado con relajaciones lineales del modelo original, de forma que se han podido eliminar o ignorar algunas de las restricciones iniciales. Para la solución exacta del modelo se ha utilizado el algoritmo “branch-and-bound”. En la investigación realizada se demuestra que este método puede ofrecer soluciones óptimas en problemas de reducido tamaño, en los que el número de unidades básicas y el número de zonas es inferior a 100 y 5, respectivamente. Todavía no se ha demostrado la eficacia del modelo en problemas de gran tamaño, en los que el tiempo de ejecución puede ser extremadamente grande.
- Ríos-Mercado y Fernández (2009) aplican un modelo MIP a un problema de diseño de zonas de atención comercial. Las zonas han de ser de tamaño similar respecto a tres actividades de medida (número de clientes, demanda del producto y fuerza de trabajo). Además se han de cumplir tres criterios: conectividad, compacidad y un número fijo de zonas. Para generar soluciones de alta calidad, se utiliza el algoritmo GRASP con una serie de mejoras. El método consiste en un proceso iterativo de cuatro fases básicas. La primera consiste en la construcción de una zonificación inicial, que no tiene que ajustarse a todas las restricciones propias de una solución, por ejemplo: el número de zonas m' puede ser diferente al especificado m , y los tamaños de dichas zonas, respecto a los atributos de medida, no tienen que ser similares. La siguiente fase se basa en el ajuste de la solución generada, de forma que el número final de zonas sea el prefijado m . En este caso se realizan procesos de fusión o partición de las zonas iniciales hasta que $m' = m$. Posteriormente se ejecuta una fase de post-proceso o de búsqueda local, para que el tamaño de las zonas sea lo más semejante posible y se mejore su compacidad. El método consiste básicamente en intercambiar unidades básicas entre zonas adyacentes hasta que se verifican los criterios establecidos o el número de movimientos sobrepasa un umbral. En esta fase se ha incluido un mecanismo de filtrado para que el postproceso se aplique solamente a las soluciones que, según el historial de la búsqueda (100 últimas iteraciones), sean las que tengan más probabilidad de mejorar la actual solución. También se ha implementado un algoritmo GRASP reactivo (R_GRASP) que usa un parámetro α adaptativo, que se auto-ajusta en función de la calidad de las soluciones anteriores, para controlar la lista de candidatos en la fase de construcción. El método se ha probado con varios conjuntos de datos, de 500 unidades básicas, creados aleatoriamente para definir 10 zonas. Se han realizado varios experimentos con diferentes valores de los parámetros que regulan la fase de construcción y utilizando dos estrategias de búsqueda. Aunque los resultados obtenidos son prometedores, la aplicación diseñada se encuentra en fase experimental y no existe una versión comercial de la misma.



2.2.2.2 Modelos de partición de grafos

El diseño de zonas también puede modelarse como un *problema de partición de grafos (PPG)*, consistente en dividir un grafo en piezas que tengan aproximadamente el mismo tamaño y con el menor número de conexiones entre ellas. Sea un grafo $G(V,A)$, donde $V=\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$ es el conjunto de vértices y $A=\{e_1, \dots, e_p, \dots, e_r\}$ el conjunto de las aristas que determinan la conectividad entre dichos vértices, de forma que $e_p=\{i,j\}$ representa la adyacencia entre los vértices i y j ¹⁹. El problema de partición de grafos consiste en dividir V en m partes (subconjuntos o subgrafos) V_1, V_2, \dots, V_m , siendo $m > 1$, de forma que las partes son disjuntas, $V_i \cap V_j = \emptyset \forall i \neq j$, tienen el mismo tamaño y se minimiza el número de aristas que conectan vértices situados en diferentes subgrafos.

La representación del territorio mediante un grafo es muy sencilla, ya que cada unidad básica se corresponde con un vértice o nodo y cada una de sus relaciones de adyacencia con una arista. Para representar ciertas características, ya sea de las unidades o de las relaciones entre cada par de ellas, se pueden asociar pesos a los nodos y aristas respectivamente. El problema de la zonificación puede formularse como la partición de los nodos de un grafo en varios subgrafos disjuntos. El resto de criterios que caracterizan el problema se pueden expresar como objetivos del proceso de partición, por ejemplo, que la suma de los pesos de los nodos de cada subgrafo sea la misma, y que se minimice o maximice la suma de los pesos de las aristas cuyos nodos finales pertenecen a subgrafos distintos.

Una gran parte de los algoritmos desarrollados para resolver un PPG se basan en un proceso de bisección recursiva. En primer lugar se realiza una partición del grafo en dos trozos. Posteriormente, de forma recursiva, cada uno de los trozos resultantes se vuelve a partir en dos elementos. Tras realizar $\log_2 m$ fases, el grafo queda dividido en m partes, cuando m es una potencia de 2, por lo que el problema de generar una partición de m elementos se ha reducido a una secuencia de bisecciones. Otro algoritmo muy conocido es el de crecimiento del grafo (graph growing algorithm), que genera un primer subgrafo, a partir de un vértice elegido aleatoriamente, al que agrega sus vértices adyacentes. El proceso recursivo de agregación de adyacentes se repite hasta que el subgrafo alcance el número de vértices que le correspondan. Dadas las deficiencias de este algoritmo, se realiza una fase de refinamiento en la que se aplican otras técnicas para explorar adecuadamente el espacio de búsqueda. Las técnicas más empleadas son: por un lado la búsqueda local y “hill climbing”, cuyo inconveniente es que el proceso puede pararse en un óptimo local; y por otro, las técnicas de “simulated annealing” y “tabu search”, cuyo uso combinado permite escapar de mínimos locales y evitar ciclos de búsqueda.

A continuación se citan algunos de los trabajos realizados en este campo de investigación:

¹⁹ Un grafo de estas características se denomina grafo de adyacencia.



- Guo et al. (2000) proponen una técnica de partición de grafos multinivel con programación en paralelo. Aunque las técnicas multinivel mejoran la calidad de las soluciones, cuando el tamaño del grafo es grande, resultan ineficaces en la exploración del espacio de búsqueda. Sin embargo, esta deficiencia puede superarse si se combina esta técnica con un procesamiento en paralelo. El algoritmo fue implementado en el lenguaje C++ e integrado en el entorno del programa MapInfo, dando lugar a la aplicación conocida por el nombre de MOZART (Multi-Objective Zoning and AggRegation Tool). Esta aplicación ha sido probada con diversos conjuntos de datos, de un número de unidades básicas inferior a 600, para generar un número de zonas en el rango de 10 a 100.
- D’Amico et al. (2002) modelan la demarcación de zonas de atención policial como un problema de partición de un grafo con restricciones. Estos autores proponen el uso del algoritmo “simulated annealing” para encontrar una “buena” partición desde el punto de vista de la jurisdicción policial. En esta aplicación no sólo se consideran las restricciones genéricas de los problemas de zonificación, tales como conectividad, compacidad y homogeneidad en el tamaño de las zonas, además hay que incluir otras adicionales como los tiempos de respuesta a las llamadas para prestación de servicios y la carga de trabajo de las patrullas de policía. La consideración de estas nuevas restricciones plantea un difícil problema de optimización no lineal. El modelo diseñado fue aplicado en el Departamento de Policía de la ciudad de Buffalo del estado de New York. A partir de 409 unidades básicas se construyó un grafo de adyacencia y se definieron 5 zonas conexas o distritos de atención policial.
- Assunção R. et al. (2006) modelan el diseño de zonas socio-económicas como un problema de partición de árboles generadores²⁰ mínimos (minimum spanning trees, MST). Una vez definido el grafo que representa a las unidades básicas y a sus relaciones de vecindad, se asigna a cada arista un costo que es inversamente proporcional a la similitud entre las unidades que conecta (similitud respecto a uno o varios atributos). Con estos datos, el algoritmo construye un árbol generador mínimo (MST), que es un árbol generador de costo mínimo (el costo se calcula como la suma de los pesos de todas las aristas del árbol). Estos autores proponen un método de partición del MST mediante la eliminación sucesiva de las aristas que conectan unidades diferentes (no similares), aplicando una heurística de optimización basada en una división jerárquica. Como resultado se obtiene una partición en clusters o regiones conexas que tienen la máxima homogeneidad interna. El algoritmo diseñado se ha denominado SKATER (Spatial

²⁰ Informalmente, un árbol generador (spanning tree) T de un grafo conexo G es una selección de las aristas de G que forman un árbol que se expande o abarca cada vértice. Es decir, todos los vértices se encuentran en el árbol, pero no se forman ciclos o bucles. También puede definirse como un conjunto máximo de aristas de G que no contiene ciclos, o como un conjunto mínimo de aristas que conectan todos los vértices.

‘K’luster Analysis by Tree Edge Removal), está implementado en software de código abierto y forma parte de la biblioteca SIG de TerraLib. El método ha sido probado con información de varios municipios brasileños, en concreto con las 1999 unidades censales de Belo Horizonte y con datos de 14 de sus variables socio-económicas. En los experimentos realizados se generaron zonificaciones compuestas por un número variable de 2 a 300 regiones, analizando, en cada caso, el grado de homogeneidad interna de las regiones respecto a las variables utilizadas.

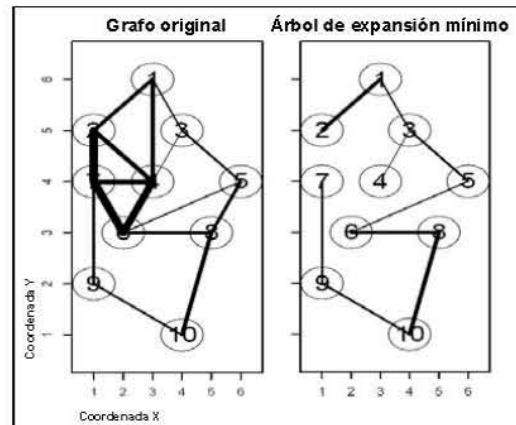


Figura 3. Un grafo y su correspondiente árbol generador mínimo (adaptación de Assunção R. 2006).

- Tavares-Pereira et al. (2007) modelan el diseño de zonas basado en múltiples criterios como un problema de partición de grafos (grafo de adyacencia). Estos autores proponen el uso de un algoritmo híbrido (LSEA)²¹, resultado de combinar un algoritmo evolutivo con un proceso de búsqueda local. A partir de una solución trivial inicial, donde cada zona está formada por un vértice o unidad básica, se aplica un proceso de “fusión (merging)” que consiste en ir agrupando sucesivamente dos zonas vecinas hasta que se alcanza el número de zonas previamente establecido. En este proceso se puede implementar una regla heurística para elegir los pares de zonas adyacentes que serán fusionadas. La estrategia de selección generalmente depende de los criterios y/o de las restricciones de cada problema. En cada iteración, tras asignar un valor de ajuste a cada individuo de la población o zona, se eligen “aleatoriamente” dos soluciones (zonificaciones) diferentes, para aplicar los operadores de cruce y mutación y formar una nueva generación. Al mismo tiempo se construye una lista de soluciones potenciales, a la que se aplica un proceso de búsqueda local para obtener una de las dos soluciones citadas anteriormente. El modelo diseñado fue aplicado a un problema de transporte en la región de París, para redefinir las zonas de precio fijo de los billetes. A partir de 1300 unidades básicas se construyó un grafo de adyacencia y se definieron entre 20 y 30 zonas con un precio diferente para el billete de transporte. En este caso se consideraron 6 criterios (4 inter-zonales y 2 intra-zonales) y 3 restricciones. Los resultados obtenidos en las pruebas fueron satisfactorios.

²¹ LSEA: Local Search Evolutionary Algorithm.



2.2.2.3 Modelos de análisis cluster

Como ya se ha comentado en la sección anterior, el problema de diseño de zonas comparte una serie de elementos comunes con el análisis cluster. No obstante, existen algunas diferencias entre los objetivos y restricciones que caracterizan a uno y otro. El objetivo del análisis cluster consiste en agrupar elementos para generar conjuntos internamente homogéneos y diferentes entre sí²². En la mayoría de las aplicaciones del diseño de zonas se presenta el caso contrario, la agregación tiene por objetivo generar conjuntos que sean similares y homogéneos entre sí. Además, las restricciones de carácter espacial incluidas en el diseño de zonas (conectividad, compacidad...) son las que han establecido más diferencias entre ambos problemas. No obstante, tal y como se describe en el apartado “Clasificación de los modelos”, se han utilizado algunos procedimientos de clustering temático y espacial en procesos de zonificación (Rosing y ReVelle 1986).

Uno de los modelos más importantes ha sido implementado en el sistema SAGE, Spatial Analysis in a GIS Environment, desarrollado por Haining et al. (1996). Este sistema, integrado en el entorno de Arc/Info, ha expandido la funcionalidad de este programa con herramientas de estadística espacial que permiten un análisis interactivo de elementos con representación superficial. SAGE incluye un gran número de técnicas y métodos de análisis tales como: clasificación y regionalización, correlación espacial, estimación Kernel y Bayesiana, modelos de regresión lineal generalizada, etc. En el método de regionalización se emplea un proceso iterativo de clustering, del tipo k-means, para generar zonas homogéneas entre sí, compactas y conexas.

Entre los modelos más recientes destaca el diseñado por Tiede y Strobl (2006). Para llevar a cabo una zonificación parametrizada han implementado un método de clustering jerárquico, agregativo y con restricciones espaciales. El modelo requiere un conjunto inicial de unidades básicas que actúan como núcleos generadores de las zonas. El proceso se inicia seleccionando las unidades adyacentes a los núcleos. Para la agregación se utiliza una restricción de conectividad, de forma que dos unidades se consideran contiguas o conexas si sus límites tienen al menos un punto en común. Esta restricción también puede implementarse de forma que la conectividad se establezca si los límites comparten un tramo común. Además, para realizar o descartar la agregación definitiva de las unidades, se aplican criterios de similitud en los valores de sus atributos. La unidad adyacente que mejor se ajuste a los criterios establecidos se fusiona con el núcleo. La técnica de clasificación basada en atributos se complementa con la restricción de adyacencia o proximidad. El proceso se realiza de forma iterativa, recorriendo todo el conjunto de datos, hasta que todas las unidades espaciales se han asignado a las diferentes regiones o se han cumplido ciertas condiciones de parada.

²² Los algoritmos de agrupamiento o clustering tienen por objetivo generar grupos o clases de alta similitud intra-clase y baja similitud entre-clases.

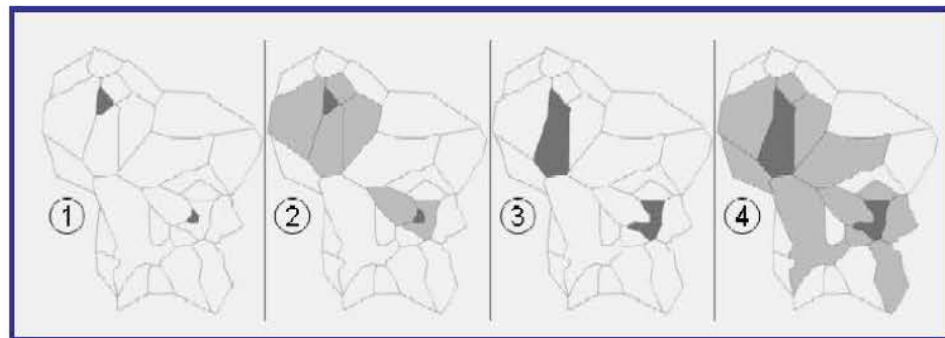


Figura 4. (1) Polígonos semilla iniciales. (2) Selección de unidades contiguas candidatas. (3) Fusión de las unidades más similares según reglas predefinidas. (4) Siguiente iteración en el proceso de selección.

El algoritmo de crecimiento empieza a partir de un conjunto predeterminado de núcleos o semillas y aplica una estrategia de clustering agregativo por pasos (stepwise aggregative clustering). Este método ha sido implementado como una extensión del entorno de ArcGIS 9, y ha sido aplicado para definir zonas energéticamente independientes, de forma que exista un equilibrio entre el consumo de la población y las fuentes disponibles de energías renovables. El experimento se realizó en una región entre Austria y Alemania, con un conjunto de datos de aproximadamente 500 unidades para definir un total de 5 zonas.

Por último destacar el trabajo de Ochoa et al. (2009) cuyo objetivo es crear herramientas que faciliten las tareas de zonificación en las que intervienen unidades asociadas a datos demográficos. Estos autores enfocan el problema como un agrupamiento (clustering), con restricciones espaciales, de unidades geográficas en función de alguna medida de similitud demográfica. Los grupos (clusters) obtenidos han de ser compactos y homogéneos, de forma que cada unidad sea lo más similar posible a la mayoría de los miembros de su cluster. En este caso, el problema de optimización se resuelve mediante una función de objetivo único con una restricción de compacidad o de proximidad geográfica. Esta restricción implica que cada unidad está próxima a una elevada proporción de las unidades de su cluster.

El método desarrollado consta de varias fases. En la primera se obtiene el conjunto de vecinos más próximos a cada unidad, en función de la distancia euclídea existente entre los puntos que representan a dichas unidades. En esta fase se calcula una triangulación de Delaunay para generar un grafo G_t en el que cada nodo tiene asignado los vecinos más próximos (en este caso son los nodos a distancia $d \leq 2$ en la triangulación). A continuación se genera un grafo de similitud no ponderado G_s , asignando a cada nodo las k unidades de su vecindad espacial que sean más similares. En la fase siguiente se aplica a G_s un algoritmo de detección de comunidades, usando una técnica muy popular en el campo de la investigación de redes complejas: la intermediación de aristas (betweenness centrality). La dificultad es encontrar comunidades de nodos afines o similares que formen sub-grafos conexos. Con esta técnica se calcula una



partición del grafo G_s que maximiza la denominada métrica de modularidad. Como resultado se obtiene un árbol jerárquico en el que cada nodo es un subconjunto de unidades geográficas. La implementación realizada está diseñada para ejecutarse en paralelo en varios procesadores.

Para probar la eficiencia de este método, se han realizado varios experimentos con dos conjuntos de datos correspondientes a las áreas metropolitanas de Toluca (466 unidades y 181 variables demográficas) y Méjico (4292 unidades). El algoritmo ha resultado ser rápido, tal y como se demuestra en las pruebas realizadas. El tiempo invertido para crear 9 clusters a partir de 875 unidades varía de 14 a 8 minutos, según se utilice un único procesador o 5 procesadores en paralelo. El problema de esta metodología, en la fase actual de desarrollo, es que no garantiza la formación de zonas o clusters conexos. Además se considera que todas las unidades son geométricamente iguales, simplificando su representación espacial mediante un punto y sin tener en cuenta los problemas que pueden derivarse al considerar su forma y dimensiones reales en la formación de los clusters.



2.2.2.4 Otros modelos: Diagramas de Voronoi

Una de las mayores dificultades que se presenta en la resolución automática de los problemas de diseño de zonas es la implementación de la conectividad espacial, complejidad que aumenta si aparece unida a la restricción de compacidad. La formalización de la conectividad en términos algebraicos resulta bastante problemática en los modelos de programación lineal, lo que ha supuesto la ineficacia y el gran coste computacional de estos métodos en problemas de gran tamaño. Además, la mayoría de los algoritmos heurísticos utilizados en los modelos de solución han dejado de lado la inherente naturaleza geográfica del problema (Kalcics et al. 2009). La necesidad de encontrar otros modelos más eficientes que utilicen la información espacial y métodos propios de la Geometría Computacional, ha motivado el desarrollo de nuevas heurísticas aplicadas a modelos de grafos y, más recientemente, a diagramas de Voronoi.

El **Diagrama de Voronoi** es uno de los métodos clásicos de regionalización del espacio alrededor de un conjunto predeterminado de puntos o generadores. Se basa en encontrar el generador más próximo a cada punto del espacio. Dado un conjunto finito $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ de puntos en el plano, con $m \geq 2$, a cada p_j se le asocian aquellos puntos del plano que están más cerca de él que de cualquier otro de los p_i ($i \neq j$), formando una región alrededor de dicho p_j . Los puntos que disten lo mismo de dos elementos de P , definen la frontera de cada región. Los conjuntos que se obtienen forman una teselación del plano, en el sentido de que son exhaustivos (todo punto del plano pertenece a alguno de ellos) y mutuamente excluyentes salvo en su frontera. A esta teselación se la denomina *Diagrama de Voronoi*. Los puntos del conjunto P reciben el nombre de *generadores* del diagrama. A cada una de las regiones resultantes se las llama *regiones, polígonos o celdas de Voronoi*. Formalmente $V(p_i)$ es la celda de Voronoi del punto $p_i \in P$, tal que $V(p_i) = \{p \in \mathbb{R}^2 \mid |p - p_i| \leq |p - p_j|, \forall 1 \leq j \leq m, i \neq j\}$, donde $|\cdot|$ es una función de distancia. Si la distancia se define en términos de la métrica euclídea, se habla de los diagramas de Voronoi estándar, donde las regiones son adyacentes y las fronteras son segmentos rectilíneos.



Figura 5. Diagrama de Voronoi estándar



En 1992, Okabe, Boots y Sugihara dan un paso en el proceso de abstracción e introducen los Diagramas de Voronoi Generalizados. En lugar de métricas, los autores utilizan una función de asignación para construir la teselación del plano (Okabe et al. 1992; Okabe et al. 2000). Los diagramas de Voronoi con peso pertenecen a este tipo de diagramas.

Sea $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ un conjunto de puntos en el plano euclídeo y w_i el peso de p_i , para todo i entre 1 y m . Se denota por $dw(p, p_i)$ a la distancia entre p y p_i que, en el contexto de diagramas de Voronoi con peso, depende del valor w_i del punto p_i . Por ejemplo, $dw(p, p_i) = \|p - p_i\| - w_i$, es una distancia con peso aditivo, siendo $\|p - p_i\|$ la distancia euclídea entre p y p_i .

Dados dos puntos de P , p_i y p_j , la región de puntos que distan de p_i menos que de p_j es:

$$\text{Dom}(p_i, p_j) = \{p \in R^2 \mid dw(p, p_i) \leq dw(p, p_j)\}$$

y la región de puntos que distan de p_i menos que de cualquier otro punto de P , denominada celda de Voronoi de p_i , es:

$$V(p_i) = \bigcap_{i \neq j=1}^m \text{Dom}(p_i, p_j)$$

Finalmente, se denomina diagrama de Voronoi con peso al conjunto de celdas de Voronoi:

$$V(P, dw) = \{V(p_1), \dots, V(p_m)\}$$

En función de la distancia con peso que se utilice, dw , se obtienen distintos diagramas de Voronoi como los diagramas de potencia y diagramas con peso aditivo o con peso multiplicativo.

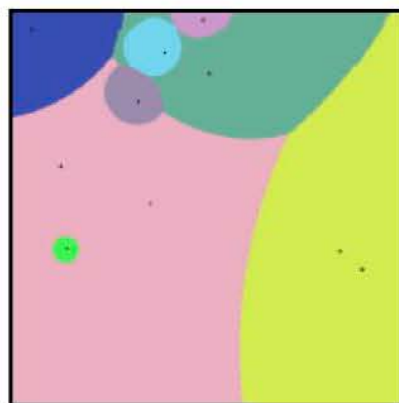


Figura 6. Diagrama de Voronoi con peso multiplicativo.

Desde la década de los años 80, en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica, los diagramas de Voronoi se vienen estudiando con gran interés por sus posibilidades de aplicación, no sólo en la representación y visualización del espacio -como un modelo de datos complementario a los tradicionales modelos raster y vectorial-, sino también en diversos procesos de análisis espacial -por ejemplo: análisis de patrones puntuales, detección de barreras en genética del paisaje...- (Gold 1991 y 1994; Okabe et al. 1992 y 2000; Gold y Condal 1995; Li et al. 1999; Chakroun et al. 2000; Gahegan et al. 2000; Chen et al. 2001; Boots et al. 2003; Gold y Angel 2006; Ledoux y Gold 2006; Dong 2008; Mu y Radke 2009; Stewart y Ree 2010).



Los diagramas de Voronoi han sido utilizados en problemas de partición espacial en diversas disciplinas relacionadas con las ciencias geoespaciales. Por ejemplo, en el ámbito de la geografía económica y urbana se han aplicado en el análisis de zonas de mercado o en el diseño de zonas de comercio al por menor (Okabe et al. 2000; Boots 1986; Boots y Getis 1988), y para resolver problemas de localización de servicios y optimización posicional (Okabe y Suzuki 1997; Okabe et al. 2000). Otros autores han aplicado estos diagramas para la construcción de unidades administrativas (Boyle y Dunn 1991), zonas censales (Martin 1998) y distritos políticos (Novaes et al. 2009). En estos casos, los límites trazados con esta técnica no resultan adecuados en la definición de este tipo de zonas, ya que no suelen ajustarse al trazado de las infraestructuras subyacentes (parcelas catastrales, carreteras...). Por último, citar la aplicación de los diagramas de Voronoi en gazetteers o tesauros geográficos (Alani et al. 2001). Los tesauros utilizan una representación del espacio que combina nombres de lugares geográficos con un conjunto restringido de datos posicionales, que proporcionan una “huella” o una aproximación al ámbito espacial referenciado por dichos nombres. Estas huellas carecen de límites espaciales y suelen restringirse al centroide o al mínimo rectángulo envolvente del objeto. Para mejorar la búsqueda de información geográfica se ha desarrollado un método basado en diagramas de Voronoi que, usando fundamentalmente las coordenadas de sus centroides, permite estimar las relaciones espaciales entre los lugares de nombre conocido y trazar los límites de sus regiones geográficas.

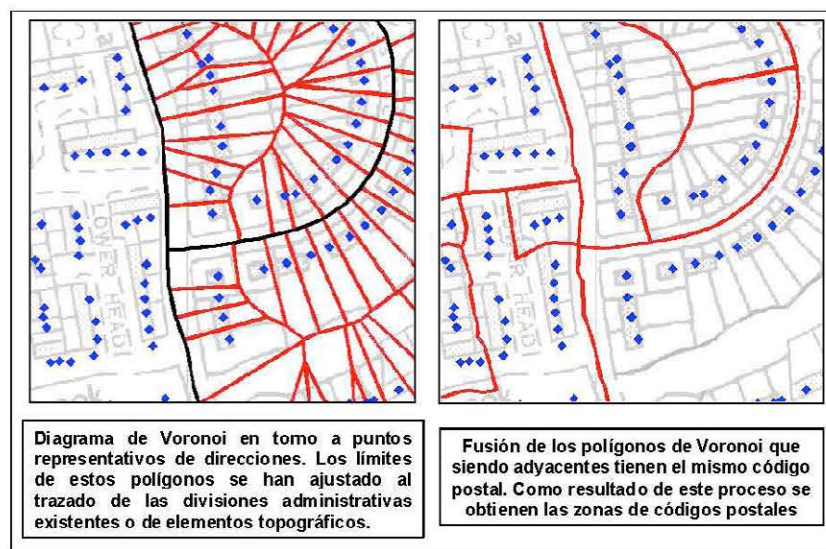


Figura 7. Ilustración gráfica del uso de diagramas de Voronoi en la construcción de zonas de código postal (adaptación de Martin 1998).

Ante la complejidad de los problemas a tratar, no sólo se han utilizado los diagramas de Voronoi estándar (DVE) sino también los diagramas de Voronoi generalizados, ya sean de potencia (DVPT), con peso aditivo (DVPA) o con peso multiplicativo (DVPM). Estos últimos han sido aplicados a proyectos de planificación urbana (Huff y Lutz 1979; Boots 1973, 1975), al diseño o modelado de zonas de comercio (Boots y South 1997), a problemas de transporte y

logística (Galvão et al. 2006; Novaes et al. 2009), a la delimitación de zonas según variables socio-económicas (Mu 2004; Mu y Wang 2006; Ahmadi 2006) y a la definición de distritos políticos (Ricca et al. 2008).

Por último, en el ámbito no geográfico de los espacios de información, también se han diseñado métodos de teselación que permiten la visualización y clasificación de grandes volúmenes de datos. En este contexto destaca el algoritmo diseñado por Stanislav I. Trubin (2006) en su tesis “Information Space Mapping with Adaptive Multiplicatively Weighted Voronoi Diagrams”. El algoritmo de partición utiliza diagramas con peso multiplicativo adaptativo y ha sido implementado en un entorno raster.

Finalmente hay que citar el trabajo de Kalcsics et al. (2009), en el que se propone un modelo genérico de solución basado en **técnicas de geometría computacional**. El modelo básico contempla los criterios de conectividad, compacidad y homogeneidad de zonas. La propuesta se basa en realizar un proceso iterativo de partición geométrica del territorio usando líneas de división. La operación básica consiste en dividir un subconjunto B de unidades básicas -por ejemplo puntos-, en dos “mitades”, B_l y B_r, colocando una línea dentro del conjunto de puntos. B_l (o B_r) se define como el conjunto de unidades básicas situadas a la izquierda (o derecha) de la línea. La partición del problema B genera dos subproblemas disjuntos, que serán resueltos de forma independiente, dividiendo cada uno de ellos mediante una línea. Este proceso iterativo de partición recibe el nombre de “dicotomías sucesivas”.

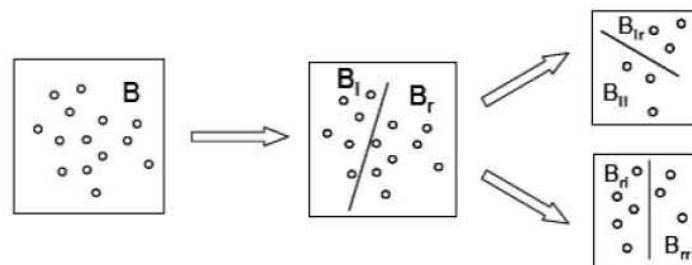


Figura 8. Ilustración gráfica del proceso de “dicotomías sucesivas” (Kalcsics et al. 2009).

El algoritmo se implementa sobre un grafo de adyacencia, en el que las sucesivas particiones de unidades básicas van generando árboles binarios o árboles de partición.

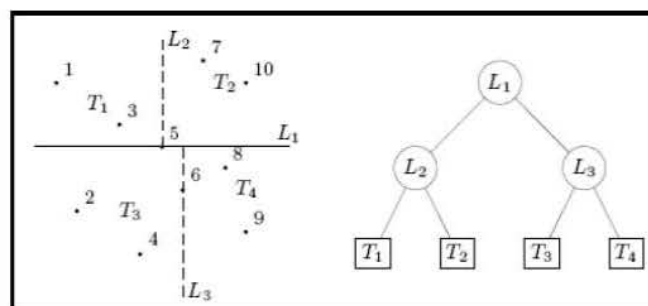


Figura 9. Partición de un conjunto de unidades básicas y su correspondiente árbol binario (Kalcsics et al. 2009).



La heurística propuesta se basa en la partición recursiva descrita anteriormente, incluyendo una serie de modificaciones para mejorar su eficiencia. El algoritmo se implementó en el lenguaje C++ y fue aplicado a problemas ficticios con un número de entre 100 y 1000 unidades básicas. Finalmente se validó con un conjunto de datos reales correspondientes a 8270 unidades de código postal de Alemania, utilizando como actividad de medida el número de habitantes. Según el análisis realizado por los autores, el algoritmo proporciona buenos resultados y es eficiente, desde el punto de vista computacional, incluso en problemas con más de 8000 unidades.

Una variante de la heurística de dicotomías sucesivas se ha implementado como algoritmo base de un programa comercial para geomarketing, denominado BusinessManager. Este programa es una extensión del SIG ArcView de ESRI y ha sido desarrollado por Geomer GMBH (www.geomer.de)²³ junto con el organismo Fraunhofer ITWM (www.itwm.fraunhofer.de)²⁴.

²³ www.geomer.de (fecha de acceso: 22-6-2011)

²⁴ www.itwm.fraunhofer.de (fecha de acceso: 22-6-2011)



2.2.2.5 Clasificación de los modelos

Los modelos diseñados para resolver de forma automática problemas relativos al diseño de zonas, con independencia del número de criterios y restricciones utilizados, pueden clasificarse en función de varios parámetros:

- 1) Consideración explícita o no de las relaciones espaciales de adyacencia entre las unidades básicas.
- 2) Metodología de construcción de las zonas en procesos automáticos.
 - 2') Restricciones impuestas al proceso de construcción.
- 3) Formalización matemática del problema
 - 3') Técnicas o algoritmos de solución aplicados.

(1) RELACIONES ESPACIALES DE VECINDAD O ADYACENCIA		(3) MODELOS DISCRETOS DE SOLUCIÓN (FORMALIZACIÓN MATEMÁTICA)	
(1.a) Las relaciones espaciales NO se consideran explícitamente		- Modelos de clasificación y análisis cluster - Partición de grafos	
(2') Semillas arbitrarias	(2) MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE ZONAS	(3') ALGORITMOS USADOS EN LOS MODELOS	
	Clustering temático	Métodos jerárquicos Métodos de partición (k-means, k-medoids) ...	
	Clustering temático y espacial		
(1.b) Las relaciones espaciales SI se consideran explícitamente		- Partición de conjuntos - Partición de grafos - Programación lineal, entera o entera mixta - Análisis cluster - Diagramas de Voronoi	
(2') Semillas de zonas predefinidas o arbitrarias	(2) MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE ZONAS	(3') TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN USADAS EN LOS MODELOS	
		Métodos Exactos	Métodos heurísticos
	Integración final de zonas construidas independientemente	- Enumeración exhaustiva explícita - Enumeración implícita con técnicas "branch-and-bound" y "branch-and-cut" - Programación lineal o entera mixta con técnicas de "branch-and-bound"	- Hill climbing - Simulated annealing - Tabu search - Algoritmos genéticos - GRASP
	Construcción simultanea de todas las zonas		
	Proceso iterativo que va introduciendo cambios de mejora en una zonificación inicial		

Tabla 4. Parámetros de clasificación de los modelos de solución para el diseño de zonas.



Teniendo en cuenta los criterios enumerados anteriormente, se propone la siguiente clasificación de los modelos aplicados a problemas de diseño de zonas:

- Modelos que no consideran explícitamente las relaciones espaciales de adyacencia entre las unidades básicas (1.a).

Siguiendo la clasificación que realiza Horn (1995), se pueden diferenciar dos modelos basados en técnicas de clustering:

- (1) Este método consta de dos fases independientes. En primer lugar se aplica un algoritmo convencional de clustering no espacial, que forma grupos de objetos similares, según criterios basados en atributos temáticos. A continuación se realiza una clasificación de estos grupos (clusters) basada en las relaciones de vecindad o adyacencia entre sus componentes. En esta fase, todos los objetos que, agrupados anteriormente en un cluster, no son espacialmente contiguos, se separan en conjuntos diferentes. Cada uno de estos conjuntos se transforma en una región. El problema de este método radica en el desconocimiento del total de regiones generadas, cuyo número será elevado cuando la autocorrelación espacial entre los datos sea mínima, es decir, los grupos de objetos similares se distribuyen de forma discontinua (dispersa) en la zona de estudio (Rosign y Re Velle 1986).
- (2) En este modelo se realiza un proceso de clustering que utiliza simultáneamente atributos temáticos y espaciales. La información espacial corresponde a las coordenadas geográficas de los centroides de los objetos. En la generación de grupos se utiliza un criterio de similitud basado en dos componentes ponderadas, relativas al espacio de atributos y a la distancia geográfica respectivamente (Haining et al. 1996, 2000). Si el peso asignado a la distancia geográfica es lo suficientemente grande, los grupos resultantes de la clasificación serán conexos. La mayor dificultad de este procedimiento radica en determinar los pesos ideales para estas dos componentes.

Esta técnica ha sido implementada en el sistema SAGE (Spatial Analysis in a GIS Environment) como método de regionalización (Haining et al. 1996). SAGE emplea un proceso iterativo de clustering del tipo k-means, cuya función objetivo se define a partir de tres criterios: a) homogeneidad: similitud en el espacio de atributos; b) compacidad: proximidad entre las coordenadas de los centroides en el espacio geográfico; c) igualdad de clusters: similitud de valores con respecto a un atributo asociado a los clusters resultantes (para cada grupo de objetos, la suma de los valores de un determinado atributo, será similar en todas las regiones).

Los procedimientos de clustering descritos no están condicionados por la relación de vecindad entre las unidades u objetos espaciales, factor que se introduce en una fase posterior o bien como una restricción indirecta al usar las coordenadas como atributos. En ambos casos, los grupos resultantes no pueden describir adecuadamente los patrones espaciales inherentes al conjunto de datos (Openshaw y Wymer 1995).



- Modelos que consideran explícitamente las relaciones espaciales de adyacencia entre las unidades básicas (1.b).

Salvo excepciones, la mayoría de los modelos utilizados en el diseño de zonas consideran explícitamente las relaciones espaciales de adyacencia entre las unidades básicas. Los modelos que se citan a continuación se pueden clasificar en función de otros dos criterios estrechamente relacionados entre sí: la metodología de construcción de zonas y las técnicas o algoritmos utilizados en dicho proceso. Primero se hará una breve enumeración de estas técnicas y después se citarán diversos métodos de construcción de zonas, haciendo referencia a dichas técnicas.

- Técnicas y algoritmos de solución implementados en los modelos (3).

El diseño de zonas puede caracterizarse como un problema de optimización combinatoria que admite varios modelos o formalizaciones matemáticas, tal y como se describe en la sección 2.2.2 (Modelización del problema). Dado que estos modelos tienen como nexo de unión el uso de algoritmos de búsqueda, se propone una clasificación basada en el método de optimización (o búsqueda) empleado, independientemente del modelo al que se aplique.

- **Métodos exactos** (su objetivo es buscar la mejor solución).

Se basan en examinar sistemáticamente, de forma implícita o explícita, todas las soluciones o posibles zonificaciones del problema, para seleccionar la mejor de ellas. Suelen utilizar algoritmos deterministas que permiten explorar eficientemente el espacio de búsqueda. El uso de este tipo de algoritmos resulta adecuado cuando dicho espacio tiene una dimensión reducida, o bien se puede determinar, para cada una de las posibles soluciones, su adecuación o grado de ajuste al problema que tratan. La técnica más básica es la de enumeración explícita, que consiste en evaluar o revisar todas y cada una de las soluciones del espacio de búsqueda, es decir, de las posibles zonificaciones.

Existen otros métodos más sofisticados que no realizan una revisión exhaustiva y explícita de todas las soluciones, como la enumeración implícita y las técnicas de “branch-and-bound” o “branch-and-cut”. Este tipo de algoritmos permiten descartar las soluciones que no se consideren razonables o adecuadas, por lo que reducen el espacio de búsqueda y el número de zonificaciones candidatas. Además, suelen utilizar heurísticas para establecer un orden en el procesamiento de las soluciones candidatas.

Un análisis combinatorio del problema de zonificación indica que el número de soluciones es exponencial con respecto al tamaño del conjunto de unidades, lo que pone de manifiesto que estas técnicas de búsqueda exhaustiva pueden ser útiles sólo en casos donde el número de unidades básicas es reducido (Horn 1995).



En el uso de técnicas de enumeración implícita destacan los trabajos de Garfinkel y Nemhauser (1970), Mehrotra et al. (1998), Nygreen (1988) y Diamond y Wright (1991), que aplicaron fundamentalmente estos métodos en modelos de partición de conjuntos. En las últimas décadas los métodos exactos han sido descartados porque su aplicación sólo es factible en problemas de tamaño reducido, donde el máximo número de unidades básicas es inferior a 100 (Kalsics et al. 2005), y por sus dificultades de implementación.

Otra variante de este tipo de métodos es la programación lineal, cuyo objetivo es buscar la mejor solución de un cierto modelo matemático, a partir de una lista de restricciones expresadas como ecuaciones lineales. El algoritmo “branch-and-bound” es una de las técnicas más empleadas en la solución exacta de este modelo, de forma que si el proceso llega a su fin o se completa satisfactoriamente, se garantiza una solución óptima (Solís et al. 2009). El problema puede ser el excesivo tiempo invertido en el proceso. Se han investigado varios modelos de programación lineal, generalmente aplicados a estructuras espaciales raster y a problemas de tamaño reducido. La mayoría de los trabajos se han realizado en aplicaciones de asignación de usos de suelo, tal y como se recoge en los estudios realizados por Williams (1995) y Cova (1999).

- **Métodos heurísticos y metaheurísticas** (para la búsqueda de soluciones buenas o casi-óptimas).

Los algoritmos heurísticos no pueden garantizar, en un tiempo finito, una solución que converja en la zonificación óptima y, generalmente, tampoco determinan la desviación respecto a ésta. Su éxito radica en encontrar una solución buena o aproximada en un intervalo de tiempo limitado, siendo capaces de resolver el problema en términos de “satisfacción” del usuario. La mayoría de estos métodos se basan en procesos iterativos que intentan mejorar, en cada fase, la solución actual del problema.

Una parte de estos procedimientos se implementan con modelos de programación entera o entera mixta (Zoltners y Sinha 1983; Crema 1996; Cova y Church 2000; Williams 2002; Aerts et al. 2003; Shirabe 2005). Tanto en estos modelos como en otros de partición de grafos o análisis cluster, se han utilizado técnicas tales como “hill climbing”, “simulated annealing” (Macmillan 2001; Aerts y Heuvelink 2002; D’Amico et al. 2002; Alvanides et al. 2002; Boyland et al. 2004), “tabu search” (Glover 1977, 1986; Glover y Laguna 1997; Ricca y Simeone 1997; Bozkaya et al. 2003) y algoritmos genéticos (Sim 2002; Bação et al. 2005; Tavares-Pereira et al. 2007), con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir el tiempo y coste computacional de las aplicaciones desarrolladas. Además de las investigaciones citadas, hay que destacar otras que han empleado modelos



basados en diagramas de Voronoi generalizados, en su mayoría de peso multiplicativo, aplicados al diseño de zonas de comercio (Boots y South 1997), a problemas de transporte y logística (Galvão et al. 2006; Novaes et al. 2009), a la delimitación de zonas según variables socio-económicas (Mu 2004; Mu y Wang 2006; Ahmadi 2006) y a la definición de distritos políticos (Ricca et al. 2008).

- Metodología de construcción de zonas (2).

Varios autores, entre ellos Bação et al. (2005), diferencian tres métodos para la construcción de zonas en procesos automáticos. Con independencia de la metodología utilizada, en todos los procesos de zonificación se aplican algunas de las técnicas de optimización citadas anteriormente. Las más difundidas son las metaheurísticas, fundamentalmente las de “simulated annealing”, “tabu search” y algoritmos genéticos. Actualmente también se están aplicando otros métodos matemáticos de partición espacial, como los diagramas de Voronoi.

Antes de describir los métodos de construcción de zonas, hay que destacar la existencia de un criterio adicional que puede intervenir en el proceso. Este consiste en ***restringir o no la ubicación de los centros***, semillas o núcleos generadores de las zonas. En muchas de las aplicaciones estos centros se eligen o posicionan aleatoriamente. En otros casos, la ubicación de estos elementos es fija y está predeterminada, formando parte del conjunto de datos de entrada.

- ***Algoritmos que inician el proceso construyendo por separado cada una de las zonas***, que posteriormente serán integradas en la solución global.

En la mayoría de los casos, el proceso se inicia seleccionando arbitrariamente un conjunto de unidades básicas, que serán consideradas los núcleos o semillas de las zonas. Posteriormente se realiza un proceso iterativo, basado en un algoritmo heurístico -por ejemplo hill climbing-, que va recorriendo las diferentes semillas. En cada iteración se construye una zona, asignando a su semilla las unidades básicas más próximas, según una métrica determinada, hasta que la zona correspondiente alcanza el tamaño deseado.

Este tipo de modelos fue utilizado básicamente en la década de los años 60, aplicado a problemas de demarcación de distritos político-electorales (Vickrey 1961; Thoreson y Liittschwager 1967; Bodin 1973).

Dadas las limitaciones de estos algoritmos, no han sido implementados en aplicaciones automáticas de diseño de zonas. Como excepción hay que citar el prototipo diseñado por Eagleson (2003), en su tesis “GIS applied to administrative boundary design”, para el trazado automático de una jerarquía espacial de zonas o límites administrativos en ámbitos urbanos. A partir de un conjunto de unidades básicas



(meshbocks), el programa calcula las coordenadas de sus centroides y selecciona una de ellas como núcleo o semilla para formar la primera zona. Este núcleo corresponde a la unidad cuyo centroide es el de coordenadas mínimas. A continuación se evalúan las unidades adyacentes a la semilla, seleccionando la que proporcione el polígono más compacto²⁵ cuando ambas se unan. Tras esta fase se genera una nueva unidad semilla, fusionando las geometrías de los elementos anteriores. Los procesos de evaluación y agregación se repiten hasta que la zona cumple los criterios establecidos por el usuario. Las fases descritas se ejecutan de forma iterativa hasta que todas las unidades del territorio hayan sido agregadas en zonas. El algoritmo se ha implementado usando Avenue, un lenguaje de programación orientado a objetos que funciona en el entorno de ArcView, un SIG de sobremesa desarrollado y distribuido por ESRI. La aplicación ha sido probada con un conjunto de datos del estado de Victoria en Australia. El número máximo de unidades utilizado fue de 200 y el mínimo de 68, para crear 86 y 15 zonas administrativas respectivamente.

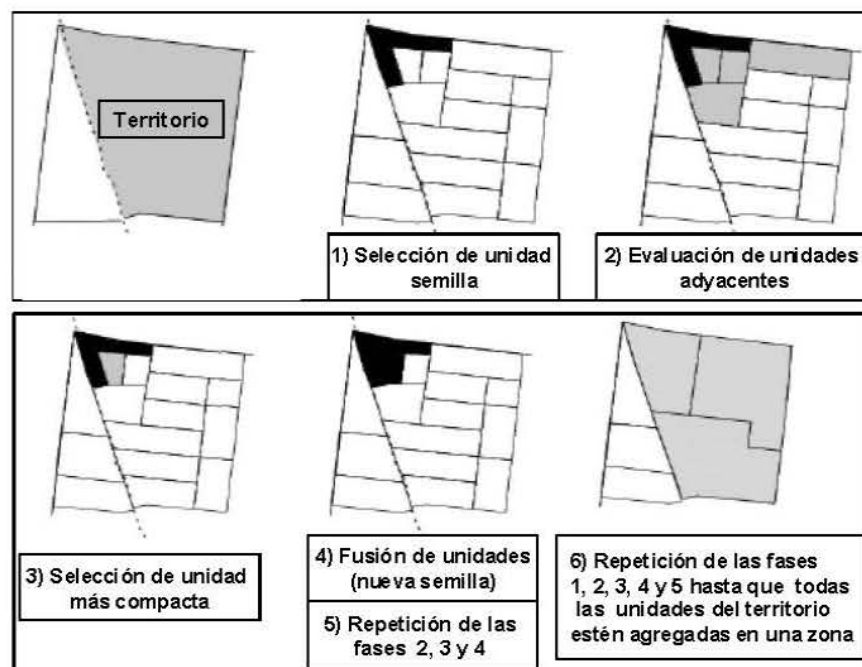


Figura 11. Ilustración gráfica, según el algoritmo implementado por Eagleson, de las fases de construcción de cada una de las zonas de un territorio. La solución final integra todas las zonas que se han ido construyendo por separado.

²⁵ En este proceso de evaluación se usa un coeficiente de circularidad que ha sido adaptado de Tornlin (1992).

- **Algoritmos que construyen simultáneamente todas las zonas**, mediante la asignación en paralelo de las unidades básicas a cada una de ellas.

Uno de los modelos más representativos es el de crecimiento múltiple de semillas (multi-kernel growth). En una primera fase se seleccionan arbitrariamente un cierto número de unidades básicas como semillas, núcleos o centros de construcción de las regiones. Posteriormente, el algoritmo va asociando a cada semilla las unidades básicas adyacentes o vecinas, hasta que la zona correspondiente alcanza el tamaño deseado (Liittschwager 1973; Rose Institute of State and Local Government 1980; Taylor 1973).

Tiede y Strobl (2006) han diseñado un algoritmo de crecimiento de regiones con un método de clustering jerárquico, agregativo y con restricción espacial de adyacencia. Este algoritmo ha sido utilizado para delimitar regiones autónomas desde el punto de vista energético, es decir, zonas donde la suma de recursos y fuentes de energía sean equiparables al consumo y demanda de sus habitantes. Al igual que en el caso anterior, el algoritmo parte de un conjunto de semillas o unidades básicas seleccionadas como núcleos de crecimiento de las regiones. En un proceso iterativo se van agregando a estas semillas las unidades básicas inmediatamente adyacentes. Cada uno de los grupos formados es analizado para decidir, en función de los criterios establecidos, si se fusionan total o parcialmente sus unidades en una pseudo-región. El proceso continua agregando elementos adyacentes a dichas pseudo-regiones, hasta que todas las unidades han sido asignadas y se han obtenido las regiones definitivas.

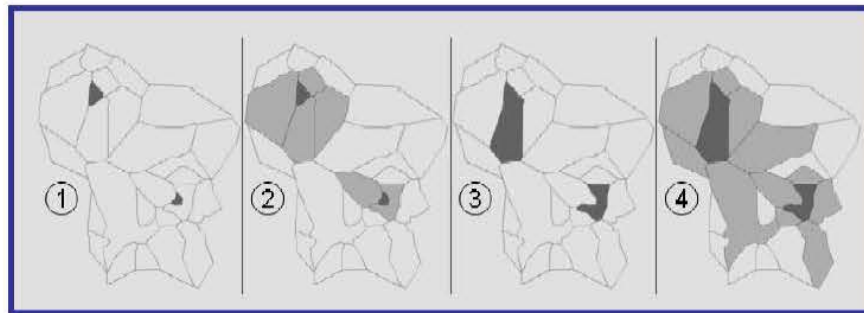


Figura 12. Ilustración gráfica, según el algoritmo de Tiede y Strobl, de la construcción simultánea de todas las zonas en torno a sus semillas.

- **Algoritmos que a partir de una zonificación o plan inicial realizan sucesivas modificaciones**, intercambiando unidades básicas entre zonas adyacentes, hasta obtener una solución mejor que la original. Para generar la zonificación de partida se puede emplear alguno de los métodos descritos anteriormente.

Este modelo es el más difundido en las aplicaciones de diseño de zonas y ha sido implementado con diferentes métodos, especialmente con técnicas de optimización de búsqueda basadas en métodos exactos y heurísticos.

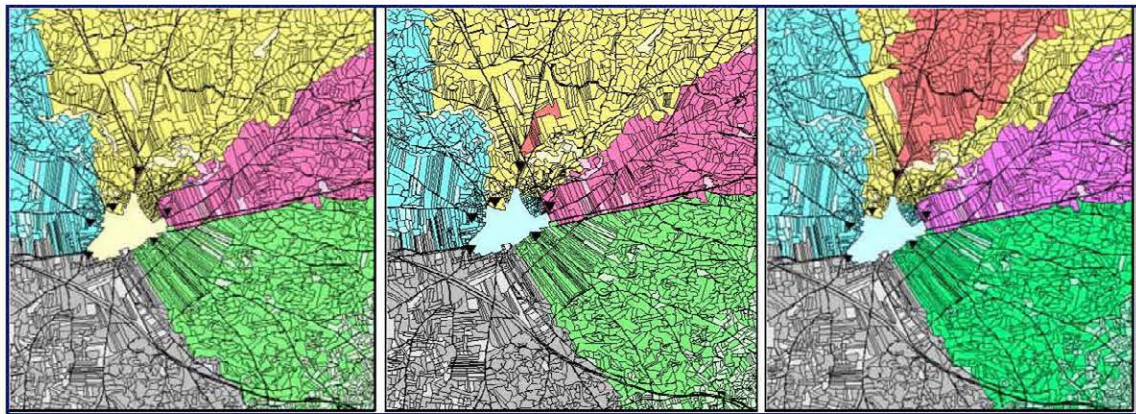


Figura 13. Ilustración gráfica del proceso iterativo de modificaciones a partir de una zonificación inicial.

Entre los primeros autores que usaron este modelo cabe destacar a Garfinkel y Nemhauser (1970), que propusieron un método de partición de conjuntos, perteneciente a los métodos exactos de enumeración implícita, para resolver un problema de demarcación de distritos políticos. En una primera fase se genera una zonificación o plan formado por un conjunto de zonas candidatas, caracterizadas por ser recintos compactos, conexos y con un total de población electoral dentro de los límites establecidos. En una segunda fase, se seleccionan aleatoriamente zonas del conjunto de candidatos para optimizar el equilibrio electoral global del plan de distritos. En la aplicación empírica de su trabajo lograron resolver problemas con un número máximo de 40 unidades básicas. Mehrotra et al. (1998) continuaron con el modelo anterior, introduciendo algunas modificaciones con el objetivo de obtener zonas más compactas. El algoritmo desarrollado permite trabajar con un conjunto de elementos mayor que en el modelo anterior, más en concreto fue aplicado a problemas de hasta de 50 unidades básicas para definir 6 zonas. Shanker et al. (1975) y Nygreen (1988) desarrollaron algoritmos con un enfoque similar al de Mehrotra. Debido a la complejidad combinatoria de los modelos de partición de conjuntos, todos los algoritmos desarrollados han sido aplicados a conjuntos pequeños de hasta un máximo de 100 unidades básicas.

Esta metodología de construcción de zonas también ha sido utilizada por otros autores, como Macmillan y Pierce (1992)²⁶ y Horn (1995) en la demarcación de distritos políticos, D'Amico et al. (2002)²⁷ en la demarcación de zonas de atención policial, etc., con la diferencia de haber aplicado otros modelos y técnicas de solución.

La aplicación Automatic Zoning Procedure, AZP, para la regionalización de unidades socio-económicas, fue diseñada con un algoritmo (Openshaw y Rao 1995) que generaba inicialmente una zonificación aleatoria de N unidades en M regiones conexas,

²⁶ Uso de un modelo de programación entera y del algoritmo “simulated annealing”.

²⁷ Uso de un modelo de partición de grafos constreñido y del algoritmo “simulated annealing”.



$M < N$. Posteriormente, mediante procesos iterativos de ensayo y error, se intentaba hacer un intercambio de unidades entre regiones vecinas, para minimizar una función objetivo sujeta a una restricción de adyacencia. El principal problema del algoritmo es que no sólo podía detenerse en un óptimo local, es decir, en una solución no excesivamente buena, sino que además el resultado estaba condicionado por la zonificación inicial, generada al inicio del proceso.

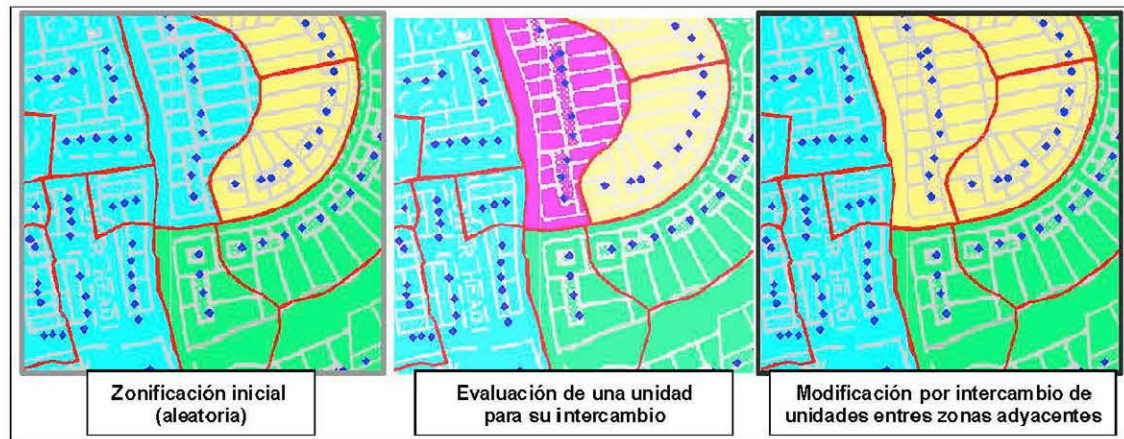


Figura 14. Ilustración gráfica del algoritmo AZP (adaptación de Martín 2000).

Alvanides et al. (2002) desarrollaron una implementación alternativa de AZP, basada en la heurística “simulated annealing”, que dio lugar al sistema Zone Design System, ZDES. El algoritmo aborda la optimización de una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones, como la conectividad (generación de zonas conexas) y la integridad (asignación de cada unidad básica a una sola región).

El programa de diseño automático de zonas A2Z (Daras 2006) también se deriva del algoritmo implementado en el sistema AZP. Al igual que en los casos anteriores, A2Z genera una zonificación aleatoria inicial que va mejorando progresivamente, mediante el intercambio de unidades básicas entre zonas adyacentes, al tiempo que se optimiza una función objetivo. La diferencia con los algoritmos anteriores consiste en que utiliza un procedimiento de agregación orientado a objetos, basado en la teoría de grafos.

El programa MOZART, Multi-Objective Zoning and AggRegation Tool (Guo et al. 2000), integrado en un entorno SIG (MapInfo), ha sido desarrollado para definir zonas de propósito general. El usuario ha de especificar el número de zonas y los criterios de diseño, siendo posible el tratamiento de varios objetivos. A partir de estos datos el programa genera un plan inicial que es evaluado respecto a los criterios y mejorado en sucesivas iteraciones. El algoritmo implementado se basa en una partición de grafos multinivel con programación en paralelo.



Finalmente, hay que destacar que la mayoría de los modelos de solución del problema de diseño de zonas son específicos de la aplicación a que se destinan y, en líneas generales, su implementación en procesos automáticos presenta una serie de deficiencias. El uso de métodos exactos ha sido prácticamente descartado, ya que sólo han resultado eficientes en problemas de tamaño reducido, donde el número de unidades básicas es sumamente pequeño. Por otro lado, las técnicas heurísticas, implementadas en diversos modelos, son capaces de encontrar buenas soluciones, pero no pueden garantizar la mejor solución y, generalmente, tampoco determinar la desviación respecto a ésta. Además, en los modelos donde se aplican, sólo algunos han resultado ser eficaces al aplicarse a territorios relativamente pequeños (Gilbert, Colmes y Rosenthal 1985) o, con independencia de su tamaño, cuando el número m de regiones a formar no sobrepasa un umbral de entre 100 y 150 (Openshaw 1977; Guo et al. 2000), o bien cuando se preseleccionan unidades “semilla” como núcleo de cada región (Cova y Church 2000).

La clasificación presentada se ha realizado a partir de la revisión bibliográfica efectuada en esta tesis. No se han encontrado otras clasificaciones más exhaustivas, a excepción de la taxonomía propuesta por Duque et al. (2006). El criterio básico de clasificación utilizado en este trabajo se basa en la estrategia utilizada por los diferentes métodos de regionalización²⁸ para cumplir la restricción de conectividad.

En la tabla siguiente se indican algunas de las características de los modelos y aplicaciones desarrolladas para resolver problemas de diseño de zonas, incluyendo información sobre los conjuntos de datos usados en las pruebas y experimentos realizados.

²⁸ Este es el término utilizado por los autores para referirse al problema del diseño de zonas.



<i>Nº máximo de unidades básicas (n)</i>	<i>Nº máximo de zonas (m)</i>	<i>Autores</i>	<i>Modelos y/o técnicas de solución</i>	<i>Objetivo de zonificación / Aplicación informática</i>	<i>Preselección de semillas (SI/NO/SD) 29</i>
n ≤ 50	m ≤ 6	Garfinkel y Nemhauser (1970)	Partición de conjuntos. Enumeración implícita (a)	Distritos políticos	SD
		Mehrotra et al. (1998)	Idem (a)	Distritos políticos	SD
n ≤ 100		Shanker et al. (1975)	Idem (a)	Distritos políticos	SD
		Nygreen (1988)	Idem (a)	Distritos políticos	SD
		Williams (2002)	MIP y spanning trees	Distritos políticos	SD
	m ≤ 5	Solis et al. (2009)	Uso de MIP con técnicas de branch-and-bound	Zonas de atención comercial	SD
	m ≤ 7	Baçaõ et al. (2005)	Algoritmos genéticos	Distritos políticos	NO
n ≤ 200	m = 1	Shirabe (2005)	MIP, técnicas de flujo de redes		SI / NO
	m ∈ [15...86]	Eagleson (2003)	Agregación espacial-temática	- Zonas de gestión administrativa - Implementado en ArcView, con scripts de Avenue	SI
n ≤ 500	m ≤ 10	Ríos-Mercado y Fernández (2009)	Modelo MIP. Algoritmo GRASP	Zonas de atención comercial	SD
	m ≤ 5	D'Amico et al. (2002)	Partición de un grafo constreñido; simulated annealing	Distritos policiales	SD
n ≤ 600	m ∈ [10...100]	Guo et al. (2000)	Partición de grafos multinivel con programación en paralelo	Aplicación MOZART integrada en el entorno de MapInfo	SD
	m ≤ 5	Tiede y Strobl (2006)	Clustering jerárquico, agregativo y espacialmente constreñido	- Zonas de recursos energéticos - Extensión del entorno de ArcGIS 9	SI

Tabla 5. Conjuntos de datos utilizados en diferentes métodos de solución para problemas de diseño de zonas (I).

²⁹ SD: Sin Datos. No se han encontrado referencias explícitas a esta cuestión. En la mayoría de los casos no se usan centros preseleccionados.



Nº máximo de unidades básicas (n)	Nº máximo de zonas (m)	Autores	Modelos y/o técnicas de solución	Objetivo de zonificación / Aplicación informática	Preselección de semillas (SI/NO/SD) ³⁰
n ≤ 1000	m ≤ 19	Bozkaya et al. (2003)	Tabu search	Distritos políticos	SD
	m ∈ [200...530]	Martin (2000) Pruebas para The Tandem Consortium (Joint UNECE/EUROSTAT, 2001)	Algoritmo AZP estándar	- Zonas socio-económicas - Programa AZM	SD
n ≤ 2000	m ∈ [2...300]	Assunção R. et al. (2006)	Algoritmo SKATER (Spatial K'luster Analysis by Tree Edge Removal)	- Zonas socioeconómicas - Incluido en la biblioteca SIG de TerraLib	SD
	m ∈ [20...30]	Tavares-Pereira et al. (2007)	Algoritmo LSEA (Local Search Evolutionary Algorithm)	- Zonas condicionadas por múltiples criterios	NO
	m ∈ [8...28]	Ricca et al. (2008)	Partición de grafos con diagramas de Voronoi con peso	Distritos políticos	NO
n ≤ 5000	m ∈ [5...]	Ochoa et al. (2009)	Clustering espacialmente constreñido. Uso de técnicas de partición de grafos.	Zonas demográficas	NO
n < 8500	m ∈ [10...100]	Kalcsics et al. (2009)	Partición geométrica denominada “dicotomías sucesivas”. Algoritmo implementado en un grafo de adyacencia.	- Zonas genéricas - Desarrollo del programa BusinessManager, extensión de ArcGIS, para geomarketing	NO

Tabla 6. Conjuntos de datos utilizados en diferentes métodos de solución para problemas de diseño de zonas (II).

³⁰ SD: Sin Datos. No se han encontrado referencias explícitas a esta cuestión. En la mayoría de los casos no se usan centros preseleccionados.



2.3 Aplicaciones para la automatización de problemas de diseño de zonas

Tras una revisión del estado del arte de las aplicaciones diseñadas para la automatización de problemas de diseño de zonas, cabe concluir que las soluciones y programas existentes son de tipo ad-hoc. Las aplicaciones se han diseñado como programas independientes o bien han sido integradas en un entorno SIG, ya que estas plataformas comerciales carecen de métodos de partición que incluyan algoritmos con las restricciones espaciales necesarias en cada caso. Por lo general, en problemas de optimización espacial la contribución de estos programas comerciales se limita a utilizar métodos de superposición, métodos basados, fundamentalmente, en el estudio de las relaciones espaciales de conectividad y proximidad. No obstante, con el objetivo de facilitar los procesos de optimización, desde finales de 1980 se han desarrollado líneas de investigación para integrar modelos de programación matemática en este tipo de entornos (Densham 1994). En la última década, muchos programas comerciales de SIG han incluido como funciones estándar algunos algoritmos de optimización. Un ejemplo de ello son los módulos Network y Grid de ArcGIS (ESRI), que utilizan el algoritmo Dijkstra para resolver el problema del camino más corto usando costos de aristas no negativos. Este caso es sólo uno de los problemas de optimización espacial que pueden encontrarse. Sin embargo, otros muchos requieren una compleja formulación matemática y técnicas de solución que sobrepasan las capacidades de las herramientas estándar de un SIG (Shirabe 2005). La complejidad de los problemas de diseño de zonas requiere algoritmos específicos para los diferentes casos, por lo que resulta muy difícil definir e implementar funciones genéricas que proporcionen una solución “universal”. Por este motivo, más de la mitad de las aplicaciones desarrolladas entre 1995 y 2003, sólo han utilizado los programas de SIG para el almacenamiento de datos y la visualización de resultados (Bong et al. 2004).

A continuación se citan las aplicaciones de diseño de zonas más importantes:

- Programas para el diseño y delimitación de zonas comerciales y territorios de venta:
 - Tactician One;
 - MapInfo ProAlign (MapInfo Corporation);
 - AlignStar;
 - ProAlign (integrado en la plataforma ArcGIS).
 - BusinessManager (integrado en la plataforma ArcGIS)



- Programas para la delimitación de zonas socio-económicas:
 - AZP -Automatic Zoning Procedure- (Openshaw y Rao 1995);
 - ZDES³¹ -Zone DDesign System- (Openshaw y Alvanides 1999, Alvanides et al. 2002);
 - AZM -Automated Zone Matching Tool- (Martin 2003)
 - A2Z (Daras 2006);
 - SKATER -Spatial ‘K’luster Analysis by Tree Edge Removal- implementado en código abierto forma parte de la biblioteca SIG de TerraLib (<http://www.terralib.org> y <http://www.est.ufmg.br/leste>)³² (Assunção R. et al. 2006);
 - SAGE -Spatial Analysis in a GIS Environment- implementado en el entorno del programa Arc/Info (Haining et al. 1996).
- Programa para la delimitación de zonas en función de varios criterios: MOZART -Multi-Objective Zoning and AggRegation Tool-, el algoritmo está implementado en el lenguaje C++ e integrado en el entorno del programa MapInfo (Guo et al. 2000).
- Programas para la delimitación automática de distritos electorales (redistricting software):
 - Autobound (Digital Engineering Corporation);
 - Transcad (Caliper);
 - Geobalance (Corona Solutions).
- Programa de análisis exploratorio de datos geográficos: GeoDaTM (Anselin 2003).
- Programa que visualiza la creación dinámica de diagramas de Voronoi con peso multiplicativo y la descomposición de un polígono en segmentos mediante el proceso inverso. Los resultados se exportan al formato de cobertura de Arc-Info: CDWVD y WVD18 (Mu 2004).
- Extensiones de ArcGIS implementadas como DLL (Dynamic Link Library) para generar diagramas de Voronoi:
 - estándar alrededor de entidades puntuales (Lomas T. <http://arcscripsts.esri.com/>)³³;
 - estándar en formato raster (herramienta ‘Euclidean Allocation’ de la extensión ‘Spatial Analyst’) o en formato vectorial (extensión ‘Geostatistical Analyst’);
 - estándar o con peso multiplicativo, en formato raster, alrededor de entidades puntuales, lineales o superficiales (Dong 2008);
 - etc.

³¹ El programa ha sido desarrollado en School of Geography from University of Leeds.

³² <http://www.terralib.org>, <http://www.est.ufmg.br/leste> (fecha de acceso: 22-6-2011)

³³ <http://arcscripsts.esri.com/> (fecha de acceso: 22-6-2011)



En la lista anterior se observa cómo, en los últimos 15 años, han proliferado las aplicaciones que pueden integrarse en entornos de SIG, pudiendo hacer uso de las funciones de gestión, almacenamiento, visualización y análisis espacial de datos geográficos de estos programas. Este tipo de aplicaciones se implementan como herramientas para el tratamiento de problemas específicos más que como herramientas genéricas y versátiles de partición espacial.

En resumen, la situación descrita revela la variedad de aplicaciones existentes y su adecuación a problemas particulares, constatando la dificultad que supone generalizar los criterios correspondientes al diseño de zonas, que varían de un problema a otro.



2.4 Resumen del capítulo

En la primera sección de este capítulo se justifica la elección de “diseño de zonas”, como expresión para hacer referencia a la partición de un territorio o espacio geográfico organizado en un conjunto de unidades superficiales básicas. A continuación se ofrece una revisión histórica de los diferentes campos de aplicación del diseño de zonas, describiendo los más importantes hasta la fecha. También se indican los principales criterios de zonificación, espaciales y temáticos, usados en los ámbitos descritos, especificando las singularidades del problema estudiado en esta tesis (la zonificación asociada a la gestión de sistemas extensivos agropecuarios). Para finalizar, se describen otros problemas de partición espacial cuyos objetivos y modelos están directamente relacionados con los utilizados en el campo que se investiga.

En la siguiente sección se realiza una exploración exhaustiva de las formalizaciones matemáticas o modelizaciones aplicadas a los problemas de diseño de zonas. Se describen las técnicas heurísticas que incluyen los diferentes modelos y se indican los criterios espaciales y temáticos comunes a todos ellos. A continuación se establece una clasificación de estos modelos en función de los algoritmos que utilizan, y se analizan las aportaciones y limitaciones de cada uno de ellos.

En la última sección, se citan los programas y aplicaciones informáticas existentes para la automatización del trazado de zonas.

En definitiva, tras una revisión de los problemas y aplicaciones del diseño de zonas, cabe concluir que los modelos y programas diseñados son de tipo ad-hoc y suelen depender del contexto, de forma que las soluciones que proporcionan están influenciadas por las condiciones iniciales consideradas. Como excepción a estos hechos, hay que citar el trabajo de Kalsics et al. (2009) que, hasta la fecha, es el único que propone un modelo genérico de solución para los problemas tradicionales de zonificación. Este modelo no considera los casos donde las zonas han de tener un tamaño predeterminado, que se establece en función de las necesidades del contexto, y que representan los problemas asociados al campo de investigación de esta tesis.



3. EL MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO



“Solemos olvidar que los elementos de la geometría que se aprenden en la escuela primaria parten de conceptos abstractos, que en nada corresponden a la llamada “realidad”. Esos conceptos son el punto, que no ocupa espacio alguno, la línea, que cualquiera que sea su longitud, consta de un número infinito de líneas, una adherida a la otra y el volumen, hecho de un número infinito de planos como una baraja infinita...

De todos los conceptos geométricos, el único real es el volumen, ya que no hay cosa en el universo que carezca de profundidad.”

(J. L. Borges)



3 EL MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO

El objetivo de este capítulo es explicar el modelo de solución diseñado, el proceso de investigación seguido en el desarrollo del algoritmo, describiendo alguna de las alternativas estudiadas, y los experimentos realizados para comprobar la viabilidad de la solución final.

3.1 Introducción

El objetivo de un proceso de zonificación consiste básicamente en la agregación de un conjunto de n unidades básicas en un número m menor de regiones o zonas que han de verificar unos determinados criterios espaciales y temáticos.

Los criterios temáticos dependen del contexto y tipo de problema, por lo que varían considerablemente y pueden establecer condiciones de diversa índole. En relación con ellos, las unidades básicas, que intervienen en el proceso de agregación, suelen llevar asociado uno o varios atributos cuantitativos, denominados medidas de actividad o atributos de medida, tales como el potencial de ventas, el número de habitantes, etc. Estos atributos¹ permiten calcular el tamaño de las zonas que es uno de los parámetros usado como restricción o condicionante temático. El tamaño de una zona equivale al valor total del atributo de medida correspondiente a las unidades básicas que contiene. Formalmente, si $a(z_i)$ es el tamaño de la zona i , y a_j el valor del atributo de medida correspondiente a la unidad j , entonces $a(z_i) = \sum_{j \in z_i} a_j$. Si el objetivo del proceso es crear zonas equilibradas o de tamaño similar (zonas con igual número de habitantes, igual promedio de ventas, etc.), se considera que una zona z_i es homogénea si su tamaño $a(z_i)$ es igual al valor medio $\mu = a(X)/m$, siendo X el conjunto de unidades básicas, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ y m el número de zonas.

En el caso de las restricciones espaciales existe un conjunto básico de condiciones presentes en la mayoría de los casos², tales como:

- Integridad.
- Conectividad.
- Compacidad.
- Asignación de centros como núcleos o semillas de formación de zonas.

Por lo general, se asocia un punto representativo a cada zona, que puede ser una localización específica o simplemente su centro geográfico. La mayoría de las veces este punto coincide con el centro o centroide de una de las unidades básicas de la zona. Estos elementos pueden ser puntos fijos, predeterminados de antemano, o bien pueden establecerse aleatoriamente durante el proceso de zonificación.

¹ Para calcular el tamaño de las zonas se suele utilizar un único atributo de medida.

² Véase capítulo 2, sección 2.2.2 “Modelos de solución”, Tabla 2: Terminología y resumen de los criterios más comunes en las aplicaciones de diseño de zonas.



El problema del diseño de zonas está presente en un amplio espectro de aplicaciones, tal y como se describen en el capítulo 2, sección 2.1.2. En la mayoría de los casos, el objetivo fundamental del proceso consiste en crear zonas equilibradas, es decir, zonas de tamaño similar respecto a uno o varios atributos temáticos. Las zonificaciones destinadas a la explotación o gestión de los recursos existentes en el territorio son la excepción a este criterio básico. A diferencia del resto de aplicaciones, las zonas generadas no tienen que ser homogéneas, de forma que su tamaño se ajustará a los requisitos específicos de cada una de ellas. En este caso, el proceso también está condicionado por la restricción espacial de conectividad, no ocurriendo lo mismo con la de compacidad, lo que constituye otra excepción -de menor importancia- respecto a los criterios comunes del diseño de zonas. En la sección 2.1.2, apartado 4, se citan dos ejemplos de estas aplicaciones: la generación de polígonos de pasto para la explotación de recursos pastorales en sistemas extensivos agropecuarios, donde cada polígono ha de tener un tamaño o superficie forrajera ajustada a las necesidades alimenticias del rebaño al que está destinado, y la partición de un espacio de información en zonas de un tamaño o volumen de datos predeterminado.

En el ámbito geográfico, este tipo de zonificaciones no han sido lo suficientemente investigadas, de manera que no se conocen modelos de solución y/o aplicaciones para la delimitación automática de las zonas. La necesidad de definir particiones espaciales cuyos elementos tengan un tamaño predeterminado, ajustado a las características de cada caso, introduce una problemática específica en el diseño de zonas. Este hecho unido a la carencia de aplicaciones de carácter genérico y universal, válidas para los diferentes problemas de zonificación, justifica la necesidad de definir un modelo y método específico que permita resolver este otro tipo de casos que, en el contexto general del diseño de zonas, pueden considerarse, hasta cierto punto, “casos atípicos”.

En respuesta al problema citado, este capítulo propone el diseño de un nuevo modelo de solución y reitera la hipótesis a verificar. Este modelo se implementa en una aplicación prototipo que integra técnicas de SIG con una heurística basada en la teoría de los Diagramas de Voronoi Generalizados, más en concreto, en los Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo (DVPA). Para llevar a cabo las fases de diseño del algoritmo y desarrollo y evaluación del prototipo, se ha generado un sistema de información geográfica para la gestión de los recursos agrícolas y ganaderos de la zona de estudio, que abarca tres municipios de Toledo (El Romeral, Corral de Almaguer y Lillo). Los datos originales corresponden al parcelario de rústica de estos municipios, de forma que las parcelas catastrales, representadas según el modelo vectorial, constituyen las unidades básicas que serán agregadas en los polígonos de pasto o zonas.



Aunque la investigación se basa en el desarrollo de un prototipo en un campo de aplicación específico -gestión de sistemas agropecuarios extensivos-, el método de investigación pretende ser genérico, de forma que pueda ser aplicado a otros casos de similares características. A continuación se indican otros campos de aplicación donde aparecen este tipo de problemas de zonificación:

1. Catastro y procesos de asignación de usos del suelo.

En estos sistemas puede surgir la necesidad de redistribuir las parcelas agrícolas de un municipio alrededor de otras específicas que tienen un valor añadido, tal como: incluir algún tipo de construcción o infraestructura agropecuaria, estar dedicadas a usos agrícolas de alta productividad -invernaderos, regadíos...-, etc. El proceso consiste en asignar a los propietarios un nuevo conjunto de unidades que han de cumplir los siguientes requisitos: su superficie total ha de ser equivalente o aproximadamente igual a la que el propietario tiene registrada en el catastro y han de estar situadas en torno a sus parcelas de valor añadido, formando, si fuera posible, una región conexas.

2. Servicios.

Muchas de las empresas de este sector necesitan delimitar, en su territorio o ámbito de actuación -país, comunidad autónoma...-, unas zonas donde poder realizar con mayor eficiencia la prestación de sus servicios de venta y/o mantenimiento. Estas zonas han de definirse alrededor de las sedes u oficinas de la empresa en dicho territorio y suelen formarse mediante la agrupación de algún tipo de unidades administrativas existentes, tales como secciones censales o códigos postales. En estos casos, el tamaño de las zonas se corresponde con el número de clientes que han de ser atendidos en cada una de ellas, de forma que dicho tamaño ha de ajustarse a los recursos disponibles en la sede correspondiente, tales como: fuerzas de venta, recursos materiales, etc.



3.2 El diseño de zonas en sistemas extensivos de tipo cereal-ovino

En esta sección se han tenido en cuenta los trabajos y estudios desarrollados en el proyecto LACOPE (Landscape Development, Biodiversity and Co-operative Livestock Systems in Europe, Contrato EVK2-CT-2002-00150), en el que participa D. Rafael Caballero, investigador del CSIC, quien ha facilitado la información técnica necesaria sobre el sistema extensivo de cereal-ovino en Castilla-La Mancha.

En el proyecto LACOPE se estudian seis de los grandes sistemas extensivos europeos de producción animal. Los sistemas que se han elegido son representativos de diferentes regiones biogeográficas de Europa [Renos (Fenoscandia), Ovino en las Montañas de Tatra (Polonia), Sistema alpino Suizo, Allmende en los Alpes bávaros (Alemania), Montado en el Alentejo (Portugal) y Cereal-ovino en Castilla-La Mancha (España)]. En el proyecto se han estudiado los componentes económicos y medioambientales a fin de promover la sostenibilidad de los sistemas ganaderos extensivos.

Uno de los objetivos de LACOPE es analizar los usos actuales del suelo agrícola como fuente de recursos pastorales y forrajeros, así como modelar el efecto de algunas alternativas de manejo sobre la capacidad de sustentación de los rebaños y el déficit forrajero.

En Castilla-La Mancha el ganado extensivo predominante es el ovino que constituye la base en la que se apoya el sector del queso manchego. Este producto de gran calidad debe su especificidad no solo al proceso productivo del queso, sino al empleo de una determinada raza de ganado autóctona “manchega” y a un particular sistema de gestión extensiva de este ganado. Si se pretende no adulterar este producto, es necesario crear las condiciones en las cuales, de forma sostenible, pueda mantenerse el ganado manchego con recursos pastorales y forrajeros la mayor parte del año.

El sistema extensivo de Castilla-La Mancha tiene condiciones específicas que hacen que los ganaderos de ovino no dispongan de base territorial propia y, por tanto, dependan principalmente de residuos agrícolas del entorno para el suministro de nutrientes.

El sistema que permite poner de acuerdo a los agricultores y ganaderos está intervenido por las administraciones que han creado las denominadas Comisiones Locales de Pastos en las cuales, los dos colectivos involucrados, agricultores y ganaderos, son coordinados por la administración local.

Estas Comisiones distribuyen los pastos del municipio en polígonos que son asignados a los ganaderos. Este proceso se lleva a cabo sin disponer de ayudas técnicas adecuadas, de forma que la asignación de recursos no se fundamenta en parámetros técnicos sino en criterios relacionados con la costumbre y usos tradicionales.



El tamaño medio de las explotaciones en Castilla-La Mancha es pequeño, 35 ha (JCCM 1999)³, lo que, unido a una alta parcelación y a las limitaciones climáticas, suele impedir el mantenimiento de rebaños de un tamaño adecuado en fincas propias. Por este motivo es necesario agrupar en polígonos de pastos las parcelas de diferentes agricultores. En estos polígonos, los ganaderos disponen de una gran variedad de recursos (rastroyeras de cereales y de leguminosas anuales, rastroyeras de girasol, barbechos pastizales naturales, eriales) que provienen de un elevado número de agricultores. Los ganaderos sin tierra, a modo de compensación, pagan a los agricultores una tasa de pastoreo por hectárea. Los agricultores que disponen de un conjunto de parcelas, con una superficie superior a 200 ha, pueden establecer polígonos segregados, los cuales se salen del sistema de gestión establecido para los polígonos parcelarios (de cuya asignación se encarga la Comisión Local de Pastos).

La ganadería ovina extensiva en Castilla-La Mancha está ligada a la utilización de los recursos pastorales que provienen, de una parte, de residuos agrícolas en las tierras arables (rastroyeras y barbechos) y de otra, de recursos pastorales ligados a la superficie no arable (pastos naturales, eriales y monte de pasto). Para poder gestionar todos los recursos pastorales en un municipio, es necesario disponer de datos sobre los cultivos de sus explotaciones agrícolas (parcelas), y datos sobre el censo ganadero. Esta información permitiría, por un lado, ajustar la dimensión de los polígonos de pasto al tamaño de los rebaños y, por otro, hacer que la distribución de los recursos pastorales fuera lo más adecuada posible para facilitar la sostenibilidad del ganado.

En definitiva, la adecuada **gestión de un sistema extensivo del tipo cereal-ovino** exige cuantificar la producción potencial de pasto de las parcelas, denominada *superficie forrajera equivalente (FAE)*⁴, que se calcula en función del potencial forrajero asociado al tipo de cultivo (uso de suelo agrícola) y de la superficie que éste ocupa.

A cada tipo de cultivo se le asigna un *coeficiente o unidad forrajera normalizada (CF o UF)*, que indica el número de cabezas de ganado ovino que son alimentadas con 1 ha de dicho cultivo durante un año. El rango de valores de este coeficiente está comprendido entre 0 y 10, de manera que el mínimo corresponde a usos improductivos y el máximo a cultivos de tipo alfalfa. El cálculo de este coeficiente se ha hecho en función del siguiente estándar:

- 1 ha de rastroyera de cereal genera 1000 kg/ha de residuos de paja y 200 kg/ha de grano.
- Si 1 kg de grano-cebada equivale a 1 CF, 1 kg de paja equivaldrá a 0.15 CF. Por tanto, 1 ha de rastroyera equivaldrá a 350 CF:

$$(1000 \text{ kg_paja} * 0.15 + 200 \text{ kg_grano} * 1) = 200 \text{ CF} + 150 \text{ CF} = 350 \text{ CF}$$

³ JCCM: Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha ([www.jccm.es/Consejeria de agricultura](http://www.jccm.es/Consejeria%20de%20agricultura)).

⁴ FAE: Forage Area Equivalent (Superficie Forrajera Equivalente).



- Si una oveja consume al día aproximadamente 1 CF ($\cong 1650$ Kcal.), necesitaría 365 CF para alimentarse durante un año, por lo que puede asumirse que 1 rastrojera de 1 ha ($\cong 350$ CF) serviría para el mantenimiento anual de una oveja.

A partir del *coeficiente forrajero de la rastrojera de cereal de invierno* (CF=1), relativo a la *aportación energética de una hectárea de este cultivo*, se calculan los coeficientes del resto de los cultivos del área de estudio. Los valores de estos coeficientes han sido facilitados por D. Rafael Caballero, y se han obtenido a partir de las referencias bibliográficas existentes tanto en Castilla-La Mancha como en áreas similares (Vera y Vega y Fernández de Mesa 1987; Caballero et al. 1992; Valderrábano 1991; Ferrer y Mangado 2001; Gessous et al. 1992).

Tipo de cultivo (uso de suelo agrícola)	Coeficiente Forrajero	Tipo forraje
ALFALFA	10	ALFALFA
ALMENDROS	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
AVENA	1	CEREALES DE INVIERNO
B. MEDIOAMBIENTAL	0.5	BARBECHOS
BARBECHO TRADICIONAL	0.5	BARBECHOS
CEBADA	1	CEREALES DE INVIERNO
ERIALES A PASTOS	0.25	ERIALES A PASTOS
FORESTALES MADERABLE	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
GARBANZOS	1.5	LEGUMINOSAS DE GRANO
GIRASOL	1.5	GIRASOL
GUISANTES	1.5	LEGUMINOSAS DE GRANO
HORTALIZA(ÑO TOMATE)	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
LENTEJAS	1.5	LEGUMINOSAS DE GRANO
LINO NO TEXTIL	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
MAIZ	5	CEREALES EN VERDE (DE GRANO)
MONTE BAJO	0.5	BOSQUE MEDITERRANEO
OLIVAR	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
OTROS CULTIVOS HERBACEOS	1	CEREALES DE INVIERNO
OTROS CULTIVOS INDUSTRIALES	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
OTROS FORESTALES	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
OTROS FORRAJES	4	LEGUMINOSAS DE FORRAJE

Tabla 7. Tabla de asignación de coeficientes forrajeros a usos del suelo agrícolas (I).



Tipo de cultivo (uso de suelo agrícola)	Coefficiente Forrajero	Tipo forraje
OTROS FRUTALES	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
PISTACHO	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
RASTROJERA-MASACOMÚN	1	CEREALES DE INVIERNO
REMOLACHA	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
RETIR. OBLIG. NO FIJA	0.5	BARBECHOS
RETIRADA VOLUNTARIA	0.5	BARBECHOS
TRIGO BLANDO	1	CEREALES DE INVIERNO
TRIGO DURO	1	CEREALES DE INVIERNO
TRITICALE	1	CEREALES DE INVIERNO
TUBERCULOS	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
VEZA	5	CEREALES EN VERDE (DE GRANO)
VIÑEDO VINIFICACIÓN	0	<i>NO APTA PARA PASTOREO</i>
YEROS	1.5	LEGUMINOSAS DE GRANO
ENCINAR, LABOR ENCINAR	0.75	ENCINAR
PRADOS	10	PRADOS

Tabla 8. Tabla de asignación de coeficientes forrajeros a usos del suelo agrícolas (II).

Dado que el *coeficiente forrajero de un cultivo es un indicador de su valor energético por hectárea*, el valor pastoral de dicho cultivo dependerá de la superficie que ocupe. De hecho, la explotación por el ganado de los diferentes recursos (superficie ocupada por un determinado cultivo) no es aditiva, ya que cada uno de ellos tiene un valor pastoral muy diferente. Para poder sumar las aportaciones de todos los recursos, hay que calcular la superficie forrajera equivalente.

La aportación de una hectárea de rastrojera de cereal (grano residual + paja) puede equivaler a las necesidades de mantenimiento o gestación (15 primeros meses) de una oveja a lo largo del año. Así pues, el resultado de multiplicar la superficie pastoral de cada recurso⁵ por su coeficiente forrajero da lugar a la *superficie forrajera equivalente (FAE)*:

$$FAE_{x_j} = Área_{x_j} \times CF_{x_j}$$

FAE_{x_j} = superficie forrajera equivalente de una parcela j (x_j),

$Área_{x_j}$ = superficie de x_j ,

CF_{x_j} = coeficiente forrajero correspondiente al tipo de cultivo existente en x_j .

Las diferentes FAE ya son aditivas y representan una estimación del número de ovejas potenciales que podrían mantenerse en un municipio con una distribución específica de recursos.

⁵ Dado que la información de los cultivos en el área de estudio está vinculada al parcelario de rústica, se considerará que un recurso pastoral corresponde al tipo de cultivo (uso de suelo agrícola) asociado a una parcela.

La gestión de los recursos pastorales de un municipio se basa en la distribución de los pastos en polígonos, agrupando los recursos o parcelas agrícolas existentes. Uno de los objetivos de esta zonificación es ajustar la dimensión de los polígonos de pasto al tamaño de los rebaños. En este caso, el atributo de las parcelas (unidades básicas) que actuará como *atributo de medida, para calcular el tamaño de las zonas* o polígonos, será su *superficie forrajera equivalente*. El tamaño de cada polígono equivale al total de FAE de las parcelas que contiene, lo que determina su capacidad potencial de producir forraje, base de la alimentación de un rebaño:

$$FAE(z_i) = \sum_{x_j \in z_i} FAE_{x_j}$$

donde $FAE(z_i)$ es la superficie forrajera equivalente del polígono i (z_i) y FAE_{x_j} es la superficie forrajera equivalente de la parcela j (x_j).

Evidentemente, la contribución de las parcelas no aptas para el pastoreo al tamaño de las regiones será nula. Para finalizar el tema relacionado con el cálculo de la FAE de cada polígono, hay que mencionar la existencia de parcelas con aprovechamiento forrajero pero que no podrán ser utilizadas como recurso pastoral. Estas parcelas se caracterizan por estar completamente rodeadas por otras vedadas a los rebaños, por lo que quedan aisladas del territorio accesible al ganado. Ante esta situación, será preciso identificar las parcelas de pasto aisladas, de modo que pueda ajustarse la FAE de cada polígono a la superficie de las unidades que realmente pueden ser aprovechadas por el ganado. Si el número de parcelas de este tipo fuera significativo, y no se tuviera en cuenta, la dimensión económica del polígono podría ser incorrecta y la solución obtenida no válida.



Figura 14. Ejemplo de parcelas con aprovechamiento forrajero pero inaccesibles al ganado por su ubicación.

Para soslayar el problema descrito, se ha de utilizar cualquier técnica que permita *identificar las parcelas que son un recurso pastoral no accesible*. Uno de los métodos posibles consiste en definir los caminos que conecten cada parcela de un polígono con su semilla o generador y estén totalmente contenidos en dicho polígono. Para trazar estos caminos se puede construir un grafo



$G(V,A)$, donde los vértices representan parcelas y las aristas representan las adyacencias existentes entre dos parcelas cualesquiera del polígono, siempre y cuando ambas sean transitables. En este grafo no se consideran las aristas correspondientes a parcelas adyacentes si, una de ellas o ambas, no son accesibles al ganado. El camino estará formado por una secuencia de aristas que enlazan el vértice generador con el de una cierta parcela. Si la parcela es un recurso pastoral, es decir, tiene un valor $FAE > 0$, pero al recorrer el grafo no se puede encontrar un camino desde el generador, entonces dicha parcela es del tipo buscado, es decir, es una parcela de pasto no accesible.

Para aplicar el método descrito hay que *identificar las parcelas que admiten el paso de ganado*. Esta clase incluye tanto las parcelas que son un recurso pastoral, $FAE > 0$, como las que su aprovechamiento forrajero es nulo pero su uso es compatible con el tránsito de animales, por ejemplo: las vías de comunicación y los terrenos improductivos, ambos de $FAE = 0$. Para tener en cuenta estas diferencias, será necesario especificar no sólo el coeficiente forrajero de cada uso del suelo agrícola, base para calcular la superficie forrajera equivalente de las parcelas, sino también qué usos son transitables.

La tabla siguiente resume las propiedades de los usos del suelo que hay que considerar para localizar las parcelas que son un recurso pastoral inaccesible, y poder ajustar el valor de FAE correspondiente a cada polígono de pasto.

CARACTERÍSTICAS DE LOS USOS DEL SUELO			
Coeficiente Forrajero del uso	FAE de unidades con ese uso	Recurso pastoral	Admite tránsito de ganado
$CF > 0$	> 0	SI	SI
$CF = 0$	$= 0$	NO	SI
	$= 0$	NO	NO

Tabla 9. Propiedades de los usos del suelo que deben especificarse para definir correctamente los polígonos de pasto.

Si a cada parcela se le asocian los atributos “acceso” y “aprovechamiento”, para indicar, en el primer caso, su condición de transitable (1) o no transitable (0) por los rebaños, y en el segundo, si es un recurso que puede ser aprovechado (1) o no (0) por el ganado, la *superficie forrajera equivalente ajustada* de cada polígono, es decir, la FAE real que podrá ser explotada como recurso pastoral, se puede calcular a partir de la expresión:

$$FAE(z_i)^{ajustada} = \sum_{x_j \in z_i} FAE_{x_j} \times (\text{aprovechamiento}_j) = FAE(z_i) - \sum_{x_j \in z_i} FAE_{x_j} \times (1 - \text{aprovechamiento}_j)$$

donde $FAE(z_i)^{ajustada}$ es la superficie forrajera equivalente ajustada del polígono i (z_i), FAE_{x_j} es la superficie forrajera equivalente de la parcela j (x_j), y aprovechamiento_j es el atributo de x_j que indica si es o no un recurso que puede ser consumido por el ganado.



Desde el punto de vista de la explotación ganadera, existen dos tipos de unidades que no pueden considerarse un recurso ($\text{aprovechamiento}_j = 0$): (a) parcelas que no admiten pastoreo ni tránsito del ganado, $\text{FAE}=0$ y $\text{acceso}=0$, y (b) parcelas que teniendo aprovechamiento forrajero no pueden ser utilizadas por los rebaños al quedar aisladas o incomunicadas, $\text{FAE}>0$ y $\text{acceso}=1$. Una vez que se identifiquen las parcelas de tipo (b), será necesario modificar el valor de su atributo acceso, sustituyendo el valor 1 por 0.

CARACTERÍSTICAS DE LAS PARCELAS						
Usos de parcelas	FAE	Aprovechamiento inicial	Acceso inicial	Tipo de parcelas	Aprovechamiento	Acceso
Recurso pastoral	> 0	SI (1)	SI (1)	Recurso Accesible	SI (1)	SI (1)
				(b) Recurso No accesible	NO (0)	NO (0)
Sin uso agrícola (vías, improductivo)	$= 0$	NO (0)	SI (1)	Vías...	NO (0)	SI (1)
Uso agrícola no pastoral	$= 0$	NO (0)	NO (0)	(a) Uso agrícola vedado	NO (0)	NO (0)

Tabla 10. Atributos de las parcelas que deben especificarse para definir correctamente los polígonos de pasto.

La existencia de parcelas (a) y (b) hace imprescindible una cuantificación aproximada de la extensión que ocupan en cada uno de los polígonos de pasto. Para ello se calculará un “*índice de porosidad*”, que representará la proporción de superficie de estas parcelas respecto a las demás en cada polígono. Formalmente:

$$\text{Porosidad}(z_i) = \frac{\text{Área_No_tránsito}(z_i)}{\text{Área_Tránsito}(z_i)} = \frac{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (1 - \text{acceso}_j)}{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (\text{acceso}_j)}$$

donde $\text{Porosidad}(z_i)$ es el índice del polígono i (z_i), $\text{Área_Tránsito}(z_i)$ es la superficie total que ocupan las parcelas accesibles al ganado en dicha región, $\text{Área_No_tránsito}(z_i)$ es la superficie que ocupan las parcelas no transitables (tipos a y b) en z_i , Área_{x_j} es la superficie de una parcela o unidad j (x_j) y acceso_j es el atributo de x_j que indica si es accesible (1) o no (0) al ganado.

El índice de porosidad puede variar entre 0 -si todas las parcelas de un polígono son transitables- y el valor ∞ -cuando éste es inaccesible por completo al ganado-. Los valores $\text{Porosidad}(z_i) < 1$ indican que la proporción de terreno transitable es superior a la no transitable. Los polígonos serán más adecuados, desde el punto de vista del aprovechamiento como recurso pastoral, cuanto más se aproxime a cero su índice de porosidad. En el gráfico siguiente se ha utilizado el color para identificar los polígonos de pasto de la zona, asignando un tono oscuro a las parcelas accesibles y un tono claro a las inaccesibles.

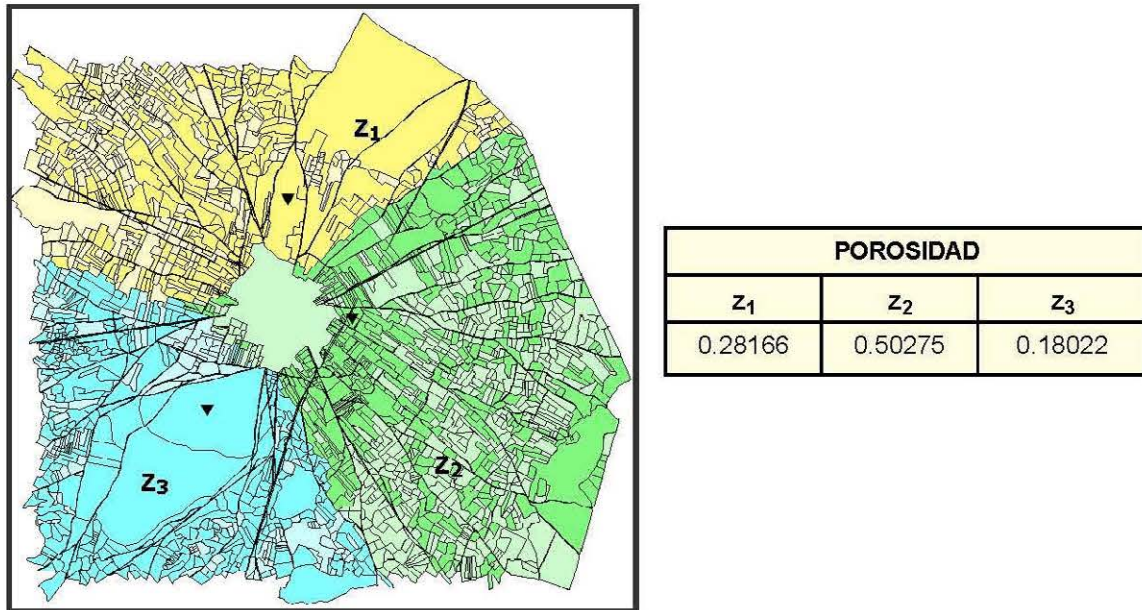


Figura 15. Visualización de las parcelas asignadas a los polígonos de pasto. Las parcelas no accesibles al ganado se representan con un tono de color menos intenso que las que sí lo son.

Tras definir el criterio temático de agregación en este tipo de zonificaciones y las anomalías que hay que tener en cuenta para ajustar adecuadamente el tamaño de cada polígono de pasto, también hay que analizar las restricciones espaciales que condicionan el diseño de estas zonas. En primer lugar, cada parcela del territorio sólo podrá ser asignada a un único polígono, de forma que cada uno de ellos será un recinto conexo formado por un conjunto de parcelas geográficamente adyacentes. Por último, dado que los rebaños se guardan en unas localizaciones específicas, denominadas apriscos, las parcelas donde éstos se ubican actuarán como semillas o núcleos de formación de sus respectivos polígonos.

3.3 Diagramas de Voronoi

Tal y como se detalla en la sección 2.2.2.4, el Diagrama de Voronoi es uno de los métodos clásicos de partición del espacio alrededor de un conjunto predeterminado de puntos o generadores. Se basa en encontrar el generador más próximo a cada punto del espacio R . Este método debe su nombre al matemático ruso Georgy Fedoseevich Voronoi quién definió y estudió el caso para un espacio n -dimensional, R^n , en 1908⁶.

Dado un conjunto finito $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ de puntos en el plano euclídeo, denominados *generadores*, con $m \geq 2$, el diagrama de Voronoi de P se define como una colección $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ de subconjuntos del plano, conocidos por el nombre de *regiones*, *polígonos* o *celdas de Voronoi*. Cada V_i es la región del plano que contiene a todos los puntos que están más cerca de p_i que de cualquier otro elemento de P . Los puntos que disten lo mismo de dos o más elementos de P definen las fronteras de las regiones.

Formalmente, $V(p_i)$ es la celda de Voronoi del punto $p_i \in P$, tal que

$$V(p_i) = \left\{ p \in R^2 \mid |p - p_i| \leq |p - p_j|, \forall 1 \leq j \leq m, i \neq j \right\}, \text{ donde } | \cdot | \text{ es una función de distancia.}$$

Si la distancia se define en términos de la métrica euclídea, $\| \cdot \|$, se habla de los *Diagramas de Voronoi Estándar (DVE)*⁷, donde las regiones son adyacentes y las fronteras son segmentos rectilíneos.

Finalmente, se denomina diagrama de Voronoi al conjunto de celdas de Voronoi $V(P, \| \cdot \|) = \{V(p_1), \dots, V(p_m)\}$.

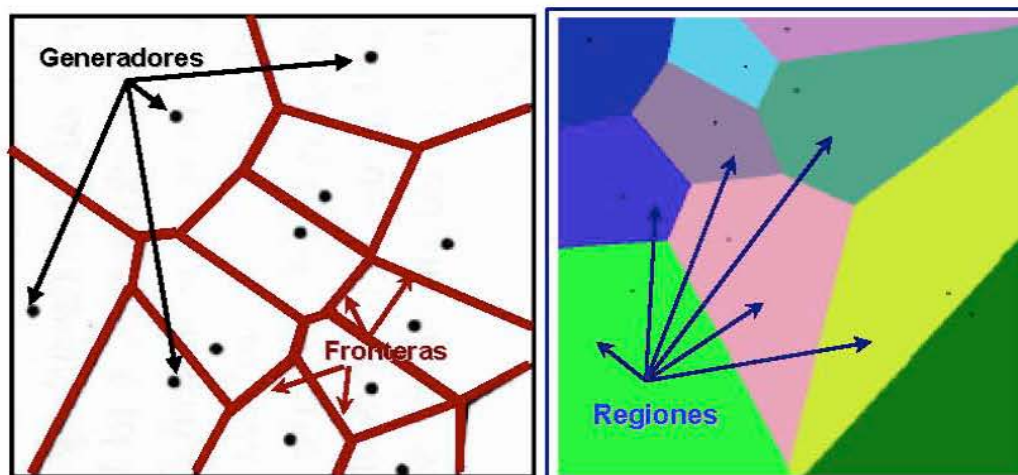


Figura 16. Diagrama de Voronoi estándar

⁶ Sobre el concepto de los Diagramas de Voronoi, tanto desde un punto de vista histórico como geométrico, consultar los textos Okabe et al. (1992) y Okabe et al. (2000).

⁷ Estos diagramas en inglés se denominan “Ordinary Voronoi Diagram” (OVD).



La visualización de la construcción dinámica de este tipo de diagramas, puede equipararse al proceso de crecimiento de un conjunto de cristales, uno por cada generador. Si todos empezaran a crecer simultáneamente y a la misma velocidad, se formarían una serie de círculos que, al encontrarse unos con otros, definirían unas líneas rectas en las zonas de choque. Estas líneas configuran las fronteras de las regiones tal y como se observa en el gráfico anterior.

Las celdas de Voronoi forman una *teselación* del plano R^2 , en el sentido de que son colectivamente exhaustivas (todo punto del plano pertenece a alguna región) y mutuamente excluyentes (ningún punto puede pertenecer a más de una región) salvo en su frontera. A esta teselación se la denomina **Diagrama de Voronoi Estándar Plano** (Okabe et al. 1992).

El diagrama de Voronoi, en un sentido más amplio, es una partición del espacio que asigna a cada “sitio o generador” los puntos más próximos a él. El concepto de sitio incluye el de punto, pero puede referirse a otras geometrías y a más de un elemento. De igual modo, la proximidad depende de la función de distancia que se utilice, por lo que puede definirse en términos de la métrica euclídea o de otras funciones. Las variaciones introducidas en los conceptos de sitio y distancia dan lugar a los diagramas de Voronoi Abstractos y Generalizados.

En 1992, Okabe, Boots y Sugihara introducen los **Diagramas de Voronoi Generalizados** (DVG). La generalización puede aplicarse:

- A los generadores, tanto en lo que respecta al número de elementos que incluye cada uno (generalización de orden) como a su tipo geométrico -punto, segmento o polígono- (generalización de sitios).

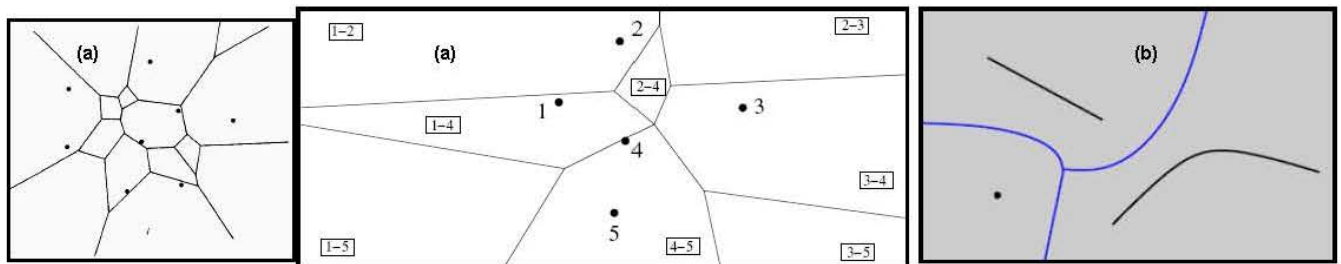


Figura 17. Ejemplos de Diagramas de Voronoi Generalizados (planos): (a) De orden 2 -cada generador incluye 2 puntos-. (b) De sitio -la geometría del generador puede ser de varios tipos-.

- A la métrica usada para determinar la proximidad a los sitios (generalización de la métrica).

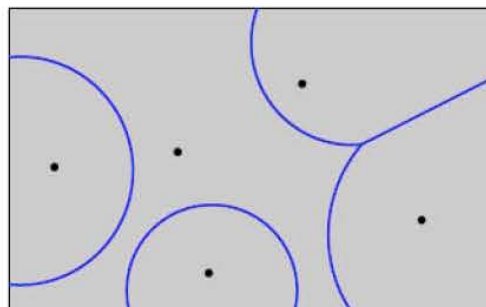


Figura 18. Ejemplo de Diagrama de Voronoi Generalizado en métrica (plano).



Los autores Okabe, Boots y Sugihara, para construir la teselación del plano utilizan, en lugar de métricas, una función de asignación. Cuando se trata de construir el DVG de un conjunto finito $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ de puntos en el plano -generadores-, dicha función es una aplicación δ , tal que a cada punto p_i de P le hace corresponder un subconjunto S no vacío de \mathbb{R}^2 . La región de Voronoi asignada por δ a $p \in P$ es el conjunto: $R_\delta(p) = \{S \in \mathbb{R}^2 : \delta(p,S) < \delta(p',S), \forall p' \neq p\}$, y el diagrama de Voronoi generalizado de P respecto a δ es: $v(P,\delta) = \{R_\delta(p_1), \dots, R_\delta(p_m)\}$. Una función de asignación es admisible cuando la intersección de dos regiones de puntos de P define una curva o bien es un conjunto vacío.

3.3.1 Diagramas de Voronoi con Peso (DVP)

Los diagramas de Voronoi con peso son un tipo de diagramas generalizados, que se caracterizan por usar una función de distancia ($dw(\cdot, \cdot)$) no definida en términos de la métrica euclídea ($\|\cdot\|$), que es la propia de los diagramas estándar.

En aplicaciones de análisis geográfico, los DVE sólo resultan útiles cuando el conjunto de generadores tiene propiedades constantes, tales como su importancia o influencia, su tasa de crecimiento y su entorno espacial. En este tipo de diagramas se asume, implícitamente, que cada generador tiene el mismo peso, por lo que la distancia medida corresponde a la distancia euclídea. Sin embargo, esta asunción no resulta adecuada en muchas circunstancias donde se necesitaría establecer pesos que reflejasen las propiedades de los puntos generadores, como por ejemplo la capacidad de atracción de un centro comercial o una ciudad. Este inconveniente podría solucionarse si se modificaran las medidas de distancia, lo que sería factible sin más que asignar pesos a los generadores. En este caso, cada uno de ellos multiplicaría todas las distancias por un factor constante igual al inverso de su peso. Una ponderación de 2 haría que todos los puntos del plano pareciesen estar a la mitad de la distancia existente a sus respectivos generadores. Esta “deformación del espacio” tendería a introducir más puntos en la región de Voronoi correspondiente al generador ponderado. La necesidad de definir particiones espaciales que reflejen las características específicas de los generadores o se ajusten a un abanico más amplio de criterios de análisis, justifican el uso de parámetros adicionales como los pesos. La figura siguiente muestra el efecto de los pesos w_i en el tamaño de las regiones -se usa la nomenclatura z_i para hacer referencia a la región de Voronoi $V(p_i)$ -.

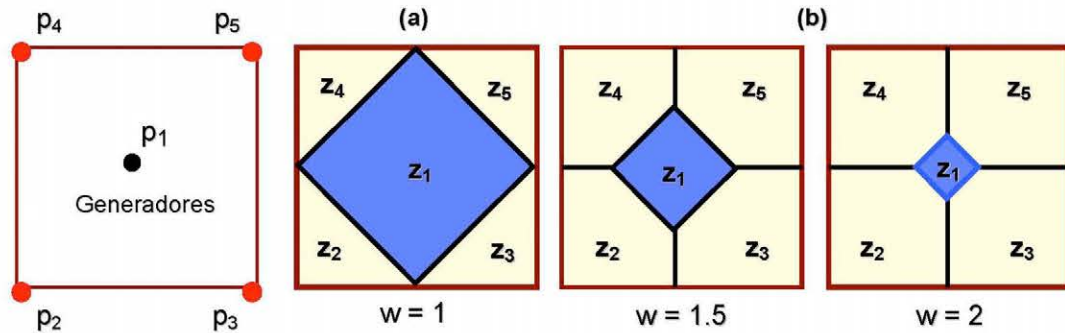


Figura 19. (a) Diagrama de Voronoi estándar. (b) Diagrama con generadores ponderados (p_2, p_3, p_4, p_5). Al aplicar el valor del peso w a los generadores, excepto a p_1 , se forma el diagrama mostrado en cada caso.

Sea $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ un conjunto de puntos en el plano euclídeo y w_i el peso de p_i , $\forall 1 \leq i \leq m$. En el contexto de los diagramas de Voronoi con peso, $dw(p, p_i)$ es la distancia ponderada entre p y p_i que depende del valor w_i del punto p_i . Dados dos puntos de P , p_i y p_j , $i \neq j$, $Dom(p_i, p_j)$ denota la región de puntos que distan de p_i menos que de p_j . La definición formal de este concepto en los diagramas estudiados sería:

- DVE (estándar): $Dom(p_i, p_j) = \{p \in R^2 \mid \|p, p_i\| \leq \|p, p_j\|\}$
- DVG (generalizado con peso): $Dom(p_i, p_j) = \{p \in R^2 \mid dw(p, p_i) \leq dw(p, p_j)\}$

La región de influencia de p_i en P , es decir la región de puntos que distan de p_i menos que de cualquier otro punto de P , llamada celda de Voronoi de p_i , es: $V(p_i) = \bigcap_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m Dom(p_i, p_j)$

Por último, se denomina diagrama de Voronoi con peso al conjunto de celdas de Voronoi:

$$V(P, dw) = \{V(p_1), \dots, V(p_m)\}$$

La definición de $dw(p, p_i)$ determina el tipo de diagramas con peso, tales como: multiplicativos, aditivos, aditivos-multiplicativos y de potencia. A continuación se describen los diagramas más utilizados en las aplicaciones de análisis geográfico.



- Diagramas de Voronoi con Peso Multiplicativo (DVPM)

La función de distancia usada en estos diagramas es: $dw(p, p_i) = \frac{1}{w_i} \|p - p_i\|$, $w_i > 0$ donde $\|p - p_i\|$ es la distancia euclídea entre p y p_i , w_i es el peso de p_i , $\forall 1 \leq i \leq m$, (pertenece a una familia de pesos estrictamente positivos) y m es el número de elementos del conjunto P (generadores).

Las propiedades más importantes de los DVPM son las siguientes:

a) Si $w_i \neq w_j$, el bisector que separa $\text{Dom}(p_i, p_j)$ de $\text{Dom}(p_j, p_i)$ es una circunferencia (circunferencia de Apolonio). Si $w_i > w_j$ la circunferencia envuelve al punto p_j .

b) La ecuación del bisector es: $\|p - p_i\|^2 = \left(\frac{w_i}{w_j}\right)^2 \|p - p_j\|^2$

c) Si $w_i = w_j$, el bisector es la mediatriz del segmento $\overline{p_i p_j}$

d) Si $\frac{w_i}{w_j}$ tiende a ∞ , el bisector se convierte en el punto p_j .

e) Las celdas de Voronoi pueden ser no conexas.

Si se visualizara la construcción dinámica de este tipo de diagramas, se observaría que los generadores empezarían a crecer simultáneamente pero con velocidades diferentes, proporcionalmente al valor de sus pesos. Las fronteras entre regiones se dibujan como curvas si y sólo si, los pesos de sus respectivos generadores son diferentes, en otro caso serán líneas rectas. Según las propiedades de estos diagramas, *una región es un conjunto no vacío, por lo tanto no necesita ser un recinto conexo y puede contener agujeros* (ciertas regiones, si crecen lo suficientemente deprisa, pueden envolver o rodear a otras). De hecho, *una región $V(p_i)$ sólo será conexa si los pesos de las regiones adyacentes toman valores iguales o superiores al suyo* ($w_i \leq w_j$, $\forall 1 \leq j \leq m$, $i \neq j$).

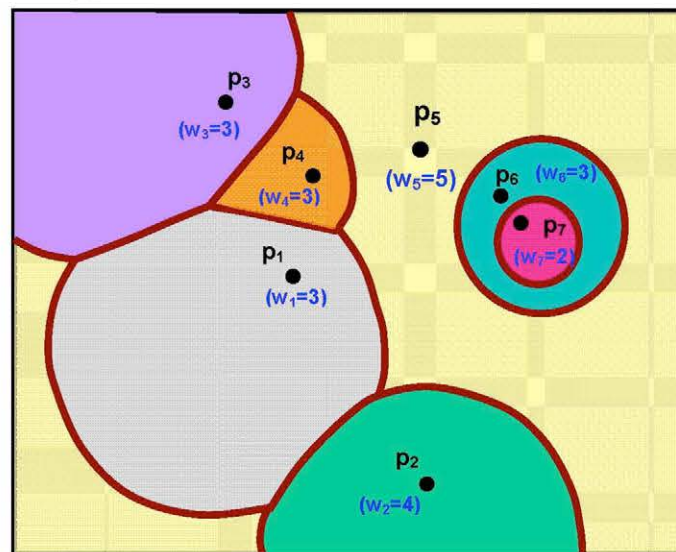


Figura 20. Diagrama de Voronoi con Peso Multiplicativo generado por 7 puntos cuyos pesos figuran entre paréntesis.



- Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo (DVPA)⁸

La función de distancia usada en estos diagramas es: $dw(p, p_i) = \|p - p_i\| - w_i$

Para que una celda o región cualquiera $V(p_i)$ no sea un conjunto vacío y, por tanto, ocupe una cierta superficie ($\text{Area}(V(p_i)) > 0, \forall 1 \leq i \leq m$), ha de verificarse: $w_i < \|p_j - p_i\| \quad \forall 1 \leq j \leq m, \quad i \neq j$

Las propiedades más importantes de los DVPA son las siguientes:

- Si $w_i \neq w_j$, el bisector que separa $\text{Dom}(p_i, p_j)$ de $\text{Dom}(p_j, p_i)$ es una de las ramas de la hipérbola con focos en p_i y p_j . Si $w_i > w_j$ la rama de hipérbola envuelve al punto p_j .
- La ecuación del bisector es: $\|p - p_i\| - \|p - p_j\| = w_i - w_j$
- Si $w_i = w_j$, el bisector es la mediatriz del segmento $\overline{p_i p_j}$
- Si $w_i - w_j = \|p_i - p_j\|$ el bisector es la semirrecta de la recta $\overline{p_i p_j}$ con extremo en p_j que no contiene a p_i .
- Si $w_j - w_i > \|p_j - p_i\|$ la celda de Voronoi de p_i es el conjunto vacío.

Si se visualizara la construcción dinámica de este tipo de diagramas, se observaría que los generadores no empezarían a crecer simultáneamente, si bien lo harían a la misma velocidad. Las fronteras entre regiones se dibujan como ramas de hipérbola si y sólo si, los pesos de sus respectivos generadores son diferentes, en otro caso serán líneas rectas. Según las propiedades de estos diagramas, *la región de un p_i puede ser un conjunto vacío*. Un generador de este tipo se denomina trivial y su característica fundamental es que está completamente contenido en el interior de otro, lo que equivale a decir que no existe el bisector entre ambos, o bien que la diferencia entre sus pesos es mayor que la distancia euclídea que los separa.

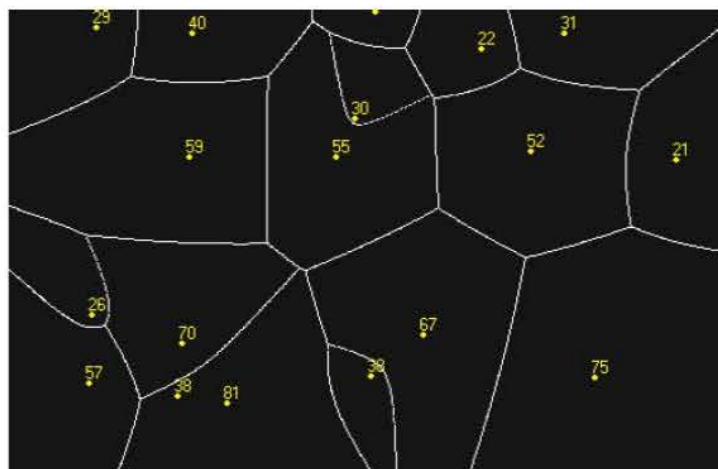


Figura 21. Ejemplo de Diagrama de Voronoi con Peso Aditivo.

⁸ Los DPVA han sido estudiados en profundidad por Ash y Bolker bajo el nombre de “teselaciones hiperbólicas de Dirichlet”.



- Diagramas de Voronoi de Potencia (DVPT)

La función de distancia usada en estos diagramas es: $d_w(p, p_i) = \|p - p_i\|^2 - w_i$ donde los pesos w_i , $\forall 1 \leq i \leq m$, suelen ser valores estrictamente positivos.

Para que un generador pertenezca al interior de su región ($p_i \in \text{Interior}(V(p_i))$, $\forall 1 \leq i \leq m$), ha de verificarse:

$$w_j - w_i < \|p_i - p_j\|^2 \quad \forall 1 \leq j \leq m, \quad i \neq j$$

Las propiedades más importantes de los DVPT son las siguientes:

- a) Si $w_i \neq w_j$, el bisector que separa $\text{Dom}(p_i, p_j)$ de $\text{Dom}(p_j, p_i)$ es una recta perpendicular a la recta $\overline{p_i p_j}$. Si $w_i > w_j$ la recta está más cerca de p_j que de p_i .
- b) La ecuación del bisector es: $\|p - p_i\|^2 - \|p - p_j\|^2 = w_i - w_j$
- c) Si $w_i = w_j$, el bisector es la mediatriz del segmento $\overline{p_i p_j}$.
- d) Si $w_j - w_i > \|p_i - p_j\|^2$ entonces $p_j \notin V(p_i)$.
- e) Las celdas de Voronoi pueden ser vacías.

En el diagrama de potencia las fronteras entre regiones se dibujan como líneas rectas, configurando recintos conexos. Al igual que en los diagramas con peso aditivo, la región de un generador p_i puede ser un conjunto vacío.

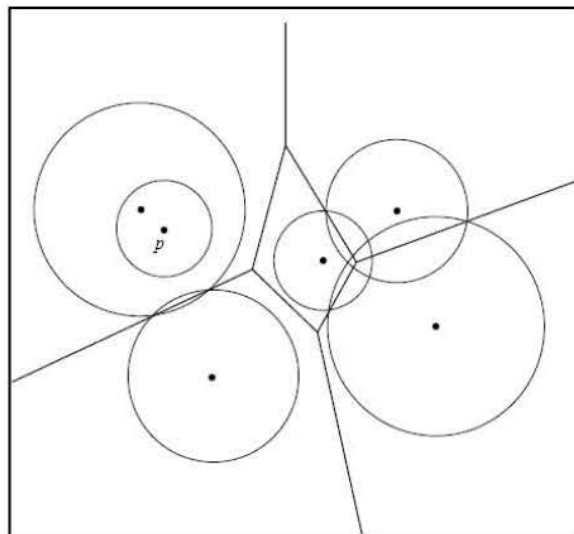


Figura 22. Ejemplo de Diagrama de Voronoi de Potencia para círculos en el plano.

Una de las aplicaciones más importantes de estos diagramas en el diseño de zonas es la delimitación de distritos con barreras. En la resolución de problemas con obstáculos, la norma euclídea no resulta adecuada (Novaes et al. 2009) por lo que se utiliza la métrica del camino mínimo o más corto. La distancia correspondiente al camino más corto entre un punto genérico x y un punto generador p_i , expresado como $dsp(x, p_i)$, se obtiene considerando todos los posibles caminos continuos que conectan x con p_i y no atraviesan obstáculos. Para calcular el valor $dsp(x, p_i)$ se usa el correspondiente grafo de visibilidad, que está formado por un conjunto discreto de caminos que conectan x con p_i y que contienen al camino mínimo. Con la ayuda de un algoritmo adecuado, como el método Dijkstra, se obtiene el valor $dsp(x, p_i)$. Hay que destacar que la necesidad de calcular distancias sobre el camino más corto, entre un punto cualquiera y un punto generador, también puede aparecer en otros problemas donde no existan obstáculos, pero se verifiquen otras circunstancias, como por ejemplo que los generadores pertenezcan a un conjunto no convexo.

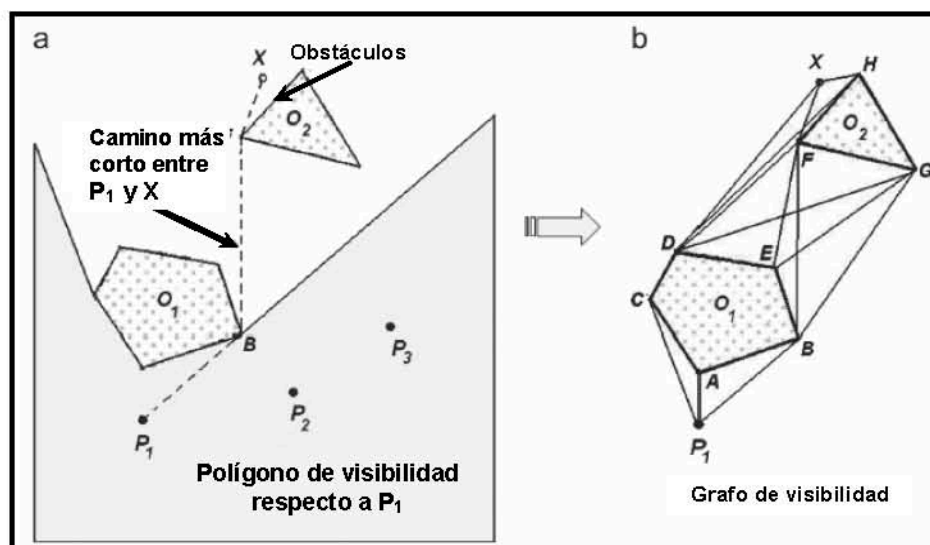


Figura 23. Ejemplo de aplicación de los diagramas de potencia en el diseño de zonas con obstáculos (según Novaes et al. 2009).



3.4 Presentación del nuevo modelo de solución

En esta tesis se propone un modelo de zonificación basado en los **diagramas de Voronoi con peso aditivo adaptativo**, a partir de ahora DVPAA, que se presenta por primera vez en el contexto del diseño de zonas en la gestión de sistemas agropecuarios. Aunque los diagramas de Voronoi con peso multiplicativo ya han sido utilizados en otras aplicaciones⁹, incluso los de tipo adaptativo (Ricca et al. 2008, Reitsma et al. 2004), la novedad del método propuesto reside en introducir los de peso aditivo en el ámbito de las zonificaciones geográficas. Con la técnica adaptativa las distancias se actualizan de forma iterativa, a fin de *ajustar el tamaño de cada zona a un valor predeterminado*.

Los criterios y restricciones que caracterizan el problema que aborda la tesis establecen diferencias significativas con respecto a la mayoría de aplicaciones de diseño de zonas:

- El tamaño de las zonas no ha de ser homogéneo.
- *La restricción espacial de compacidad* no es determinante, de forma que *puede ser eliminada del modelo*. Hay que tener en cuenta que una de las mayores dificultades, que se presenta en la resolución automática de los problemas de diseño de zonas, es la implementación de la conectividad espacial, complejidad que aumenta enormemente si aparece unida a la restricción de compacidad.
- La existencia de un *conjunto preestablecido de semillas para la generación de regiones*, lo que hace más asequible el modelo de solución para el problema genérico que plantea una zonificación. De hecho, esta restricción permite usar uno de los métodos más sencillos para la asignación de unidades básicas a las regiones: el criterio de mínima distancia, en este caso ponderada, a sus respectivas semillas.

En definitiva, el modelo diseñado¹⁰ para automatizar este problema de zonificación se caracteriza por:

- Consideración explícita de las relaciones espaciales de adyacencia entre las unidades básicas.
- Construcción simultánea de todas las zonas a partir de un conjunto preestablecido de semillas. El proceso es iterativo de forma que se introducen cambios de mejora en las zonificaciones precedentes.
- Formalización matemática del problema basada en los diagramas de Voronoi con peso aditivo adaptativo.

⁹ Véase sección 2.2.2.4: “Otros modelos: Diagramas de Voronoi”.

¹⁰ Véase sección 2.2.2.5: “Clasificación de los modelos de solución”.

El conjunto de datos de entrada al modelo computacional estará formado por una colección de unidades superficiales elementales¹¹. La representación geométrica de estas unidades ha de constituir un recubrimiento exhaustivo y excluyente de la zona de estudio, tal que sus geometrías deben ser contiguas y han de cubrir la totalidad del territorio, sin que existan huecos o solapes entre ellas.

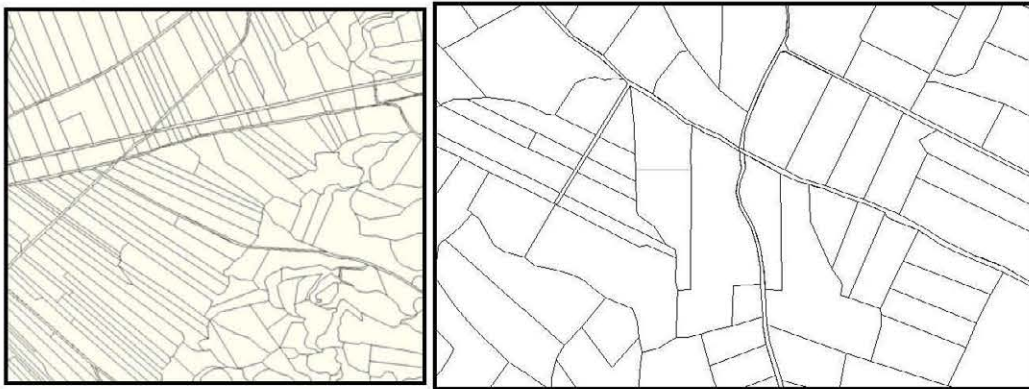


Figura 24. Ejemplos de un recubrimiento exhaustivo y excluyente.

El método de partición espacial que se presenta en este trabajo, se basa en un **diagrama de Voronoi plano construido a partir de generadores puntuales**. Dado que las unidades espaciales del territorio tienen una geometría de área, será necesario, mientras se calcula este diagrama, simplificar su representación con geometrías de punto. Este proceso de sustitución es una característica del modelo diseñado que sacrifica, hasta cierto punto, la información dimensional de los datos de partida. Si en el diagrama de Voronoi se utilizaran las geometrías originales de área, el cálculo de las distancias entre las unidades aumentaría enormemente la complejidad del modelo.

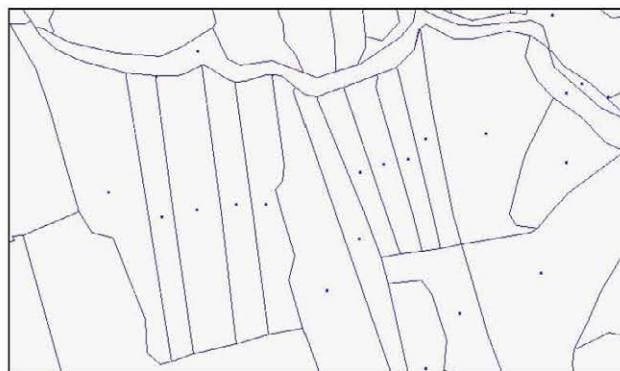


Figura 25. Geometrías de las unidades básicas y puntos representativos de cada una de ellas.

¹¹ Las unidades básicas en los sistemas extensivos de tipo cereal-ovino son los recintos dedicados a un determinado aprovechamiento o uso del suelo. En España estos recintos se corresponden con las subparcelas del catastro de rústica.



En definitiva, la *sustitución de las unidades básicas por un conjunto de puntos representativos*, implica transformar el espacio continuo del territorio en un espacio discreto. En la **versión discreta del diagrama de Voronoi**, las regiones estarán formadas por el conjunto de puntos más próximos a cada punto generador. Una vez que se calcule el diagrama, para poder construir las zonas obtenidas se restituirá a cada punto su geometría original de área. Esta restitución es necesaria para adaptar el trazado de las zonas al de las unidades subyacentes.

La utilización de puntos representativos aparece en otras aplicaciones, tales como el estudio de patrones espaciales en la jerarquía urbana de Estados Unidos (Mu y Wang 2006). Los autores diseñaron un modelo geométrico computacional, basado en un diagrama de Voronoi plano con peso multiplicativo (DVPM), que se calculaba a partir de generadores puntuales. En este caso, las unidades básicas eran 273 áreas metropolitanas -definidas por datos estadísticos del censo-, de las que se calcularon sus respectivos centroides para generar el conjunto de datos de entrada.

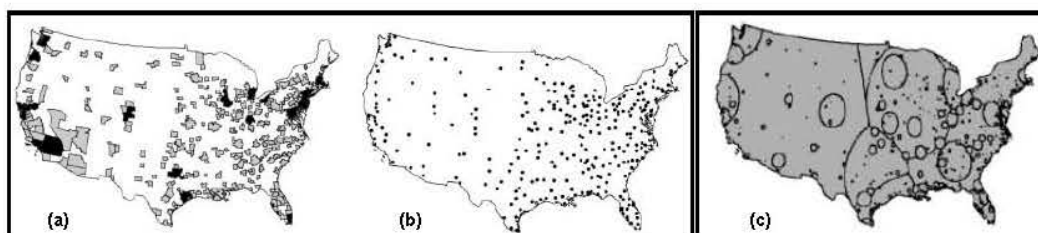


Figura 26. (a) Áreas metropolitanas estadísticas. (b) Centroides de estas áreas. (c) Regiones de influencia de las áreas metropolitanas obtenidas a partir de un DVPM (Mu y Wang 2006).

Uno de los objetivos del modelo era visualizar la extensión teórica de las regiones de influencia de estas áreas metropolitanas en todo el territorio de los Estados Unidos. En esta aplicación, el trazado de las regiones no tenía que ajustarse al de ninguna infraestructura subyacente, por lo que no era necesario restituir la geometría original a las áreas metropolitanas.

La sustitución de las unidades superficiales por geometrías de punto plantea, entre otras, las siguientes cuestiones:

- *¿Qué características ha de reunir el punto para ser representativo de la superficie?*
- *El conjunto de puntos seleccionado y la métrica usada en el medida de distancias ¿puede afectar a los resultados obtenidos?*

En este trabajo, por cuestiones de eficacia, se ha elegido como punto representativo el *centroide o centro de gravedad de las unidades de área*, ya que todas las bibliotecas de objetos y programas de SIG disponen de una función que calcula dicho elemento. Según la forma del recinto, el punto generado puede ser interior o exterior al área. En este último caso es posible sustituir dicho punto por otro alternativo dentro del recinto.

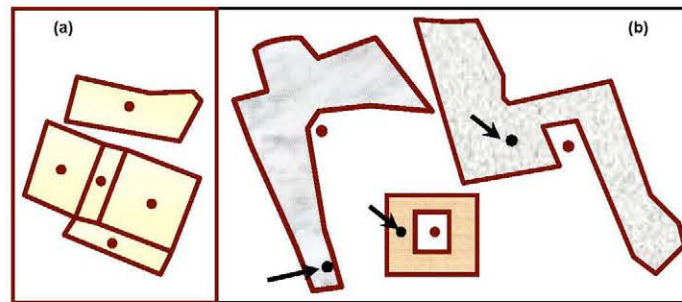


Figura 27. Cálculo de centroides como: (a) puntos interiores o (b) puntos exteriores a las áreas. En (b) se marca con una flecha la posición interior alternativa del centroide.

Evidentemente, el conjunto de puntos calculado será diferente si se elige o no la opción de forzar su posición al interior de los recintos, tal y como puede observarse en la figura siguiente.

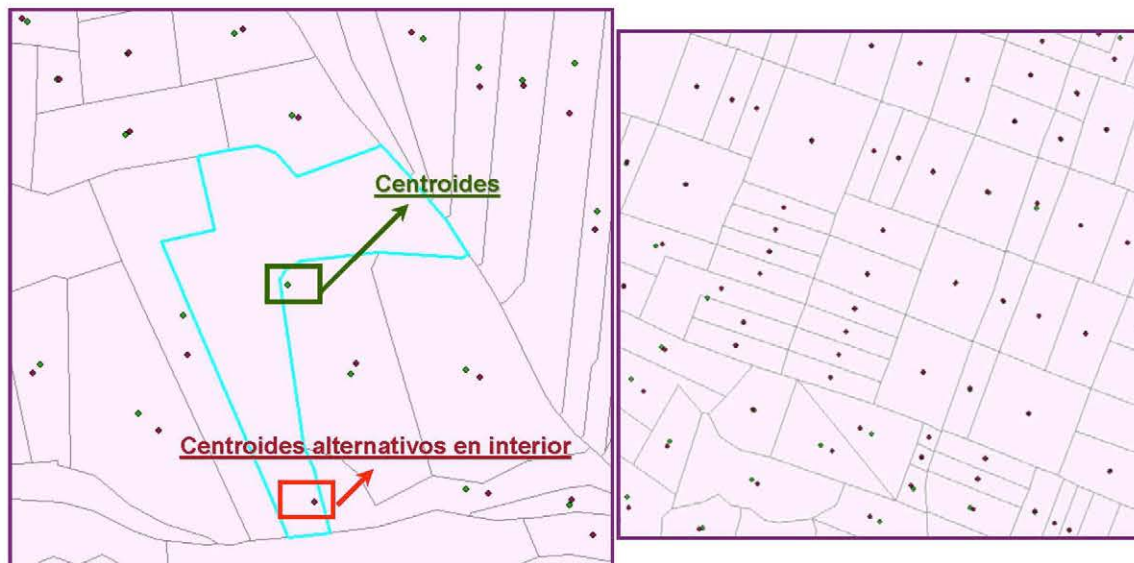


Figura 28. Ejemplo de cálculo de centroides con el programa ArcGis. En color verde se visualizan los que corresponden a los centros de gravedad, y en color rojo los obtenidos al forzar su posición al interior del área.

Independientemente de la opción de elegida, las coordenadas calculadas para el centroide dependen del algoritmo utilizado, que suele variar de unos programas a otros. El siguiente gráfico muestra las diferencias entre los puntos obtenidos con ArcGis v.9.2 (color rojo) y con GeoMedia v.6.1 (color azul) para el mismo conjunto de datos. En ambos casos, la posición de los centroides se ha forzado al interior de las geometrías de área.

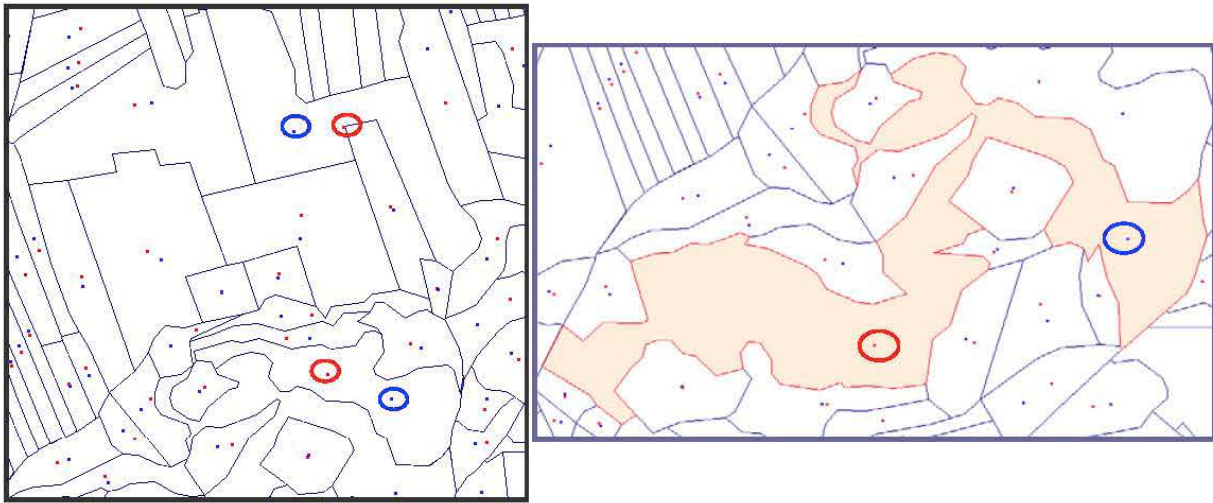


Figura 29. Ejemplo de cálculo de centroides con los programas ArcGis (color rojo) y GeoMedia (color azul).

En aplicaciones como la presente, se necesitará un conjunto de puntos interiores a las unidades básicas, por lo que la posición calculada para los centroides puede no ser la más representativa de dichos recintos. Este hecho podría causar *anomalías en la asignación de las unidades básicas a las zonas*, ya que el algoritmo se basa en la proximidad de dichos elementos a los generadores. El problema podría presentarse en las fronteras entre regiones, donde algunas unidades de una zona podrían quedar aisladas y rodeadas por unidades de la otra. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de esta situación. En este caso, los generadores p_1 y p_2 tienen el mismo peso, por lo que el proceso se basa en la medida de distancias euclídeas a los centroides del resto de unidades, asignando a cada uno las más próximas. Tras sustituir los puntos por las geometrías de área, la zona correspondiente a p_2 estaría formada por tres recintos no conexos (figura 30). Esto no hubiera pasado si el centroide de la parcela, resaltada en color, hubiera estado en una posición interior más próxima a p_2 , como por ejemplo, la que aparece en el gráfico siguiente. En este caso se forma una sola región conexa por cada generador.

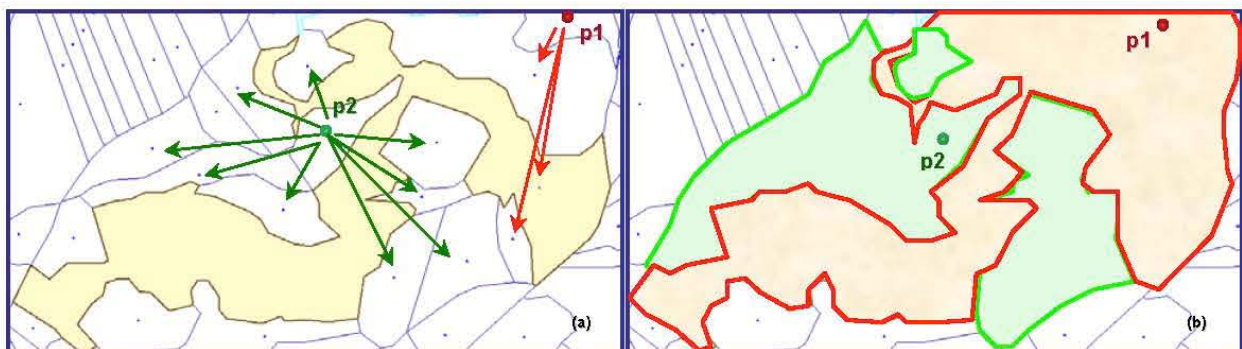


Figura 30. (a) Uso de centroides, en sustitución de las unidades de área, para calcular el diagrama de Voronoi plano estándar -medida de distancias entre centroides según métrica euclídea-. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas.

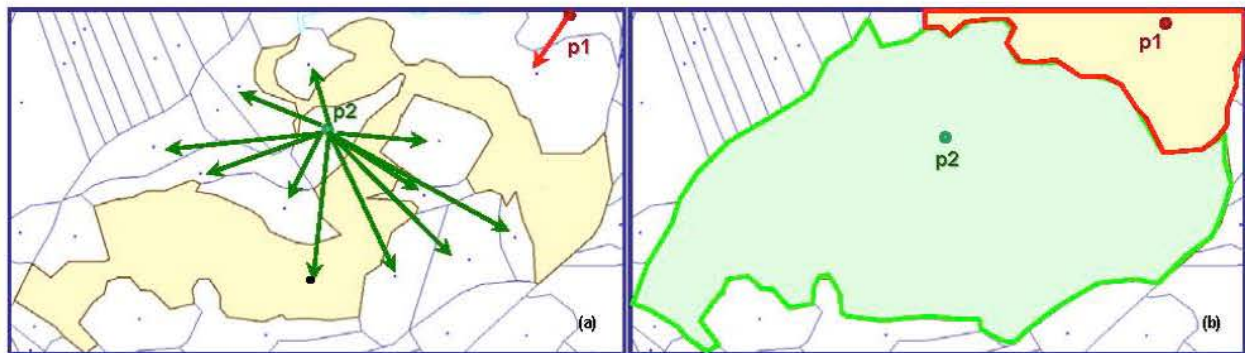


Figura 31. (a) Ejemplo igual al de la figura 30, a excepción de la posición del centroide de la parcela resaltada en color amarillo. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas a los centroides.

El problema descrito no sólo depende de la posición asignada al centroide, también está relacionado con la métrica usada para medir distancias entre dichos puntos. Si la métrica elegida estuviera basada en el camino más corto -sobre un grafo de adyacencia de centroides- en vez de en la norma euclídea, el resultado obtenido en el ejemplo de la figura 30 sería diferente. En este caso, las regiones correspondientes a p_1 y p_2 serían dos recintos conexos. La forma y dimensiones de los recintos varían si se cambia la posición del centroide correspondiente a la parcela resaltada en color, tal y como se muestra en los gráficos siguientes.

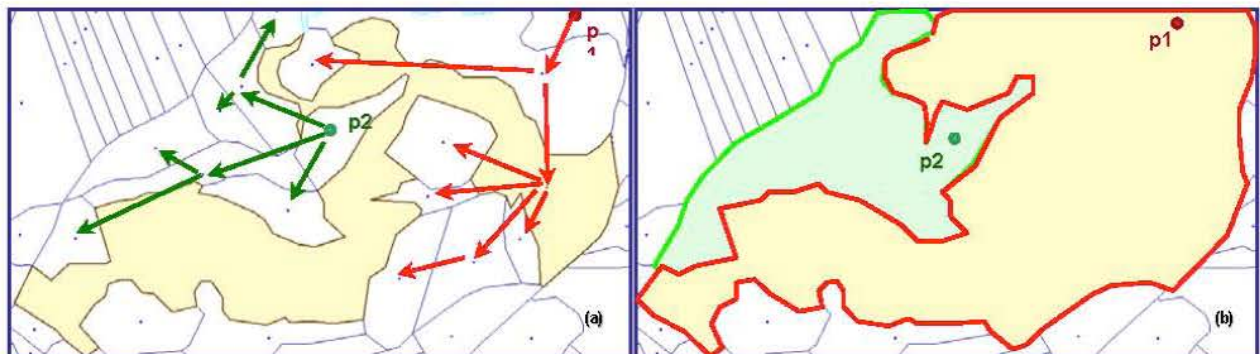


Figura 32. (a) Uso de centroides, en sustitución de áreas, para calcular el diagrama de Voronoi plano estándar -medida de distancias entre centroides según el camino más corto en su grafo de adyacencia-. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas a los centroides.

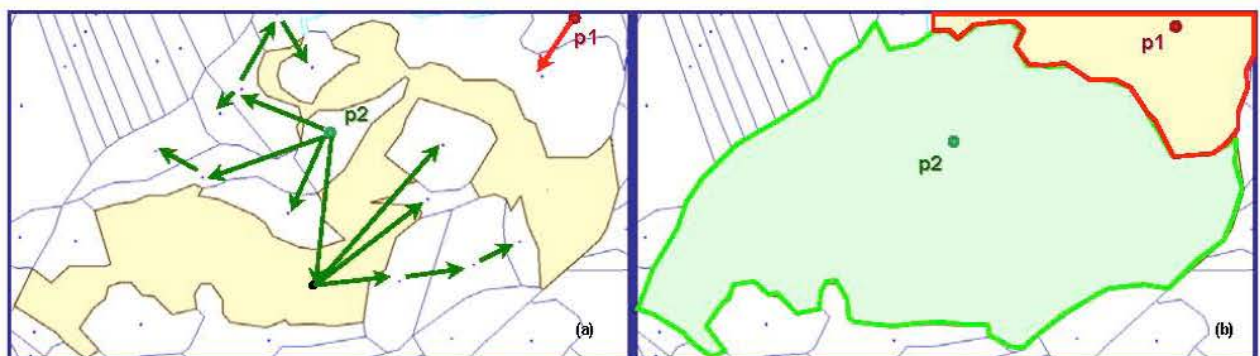


Figura 33. (a) Ejemplo igual al de la figura 32, a excepción de la posición del centroide de la parcela resaltada en color amarillo. (b) Regiones obtenidas al restituir las áreas a los centroides.



Para aclarar el cálculo del camino más corto entre dos puntos, se va a definir formalmente el grafo de adyacencia $G = (V, A, l)$ de las unidades básicas de $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, donde:

- V es el conjunto de centroides, denominados vértices, de las unidades básicas de X :

$$V = \{c_1, \dots, c_n\}$$

- A es el conjunto de aristas formado por los pares (c_i, c_j) , que por simplicidad se denominarán $c_i c_j$, tales que las unidades básicas correspondientes, x_i y x_j , tienen frontera en común (unidimensional).
- La longitud de una arista $c_i c_j$ es $l(c_i c_j) = \|c_i - c_j\|$.

En el grafo ponderado G se define:

- Un camino como la secuencia de vértices $P = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{is}\}$, tales que todos son distintos y $c_{ij} c_{ij+1} \in A$, $\forall 1 \leq j < s$.
- La longitud de un camino P como:

$$l(P) = \sum_{j=1}^{s-1} l(c_{ij} c_{ij+1})$$

Dados dos vértices de G , c_i y c_j , se dice que el camino $P = \{c_i, c_{i2}, \dots, c_{is-1}, c_j\}$ entre c_i y c_j es el camino más corto entre ambos vértices, si $l(P) = \min \{l(P') \mid P' \text{ es un camino entre } c_i \text{ y } c_j\}$ y, en este caso, la distancia entre c_i y c_j se denomina $dsp(c_i, c_j) = l(P)$.

Si se utiliza una métrica basada en el camino más corto, obviamente se cumple la propiedad de “consistencia geodésica”, de forma que en una iteración cualquiera, si el punto c_j pertenece a la región z_s y el punto c_i pertenece al camino más corto (geodésica) entre c_j y p_s (generador de z_s), entonces c_i también pertenece a z_s . Por la misma razón, cada vértice o punto de la geodésica entre j y s debe ser asignado a z_s . De esta forma, por cada c_i en z_s hay un camino de i a s completamente contenido en z_s , lo que implica que la región es un recinto conexo. Por tanto, si la consistencia geodésica implica conectividad, el uso de una métrica basada en el camino más corto resuelve el problema de conexión de cada una de las zonas.

No obstante, en función de la métrica usada para la medida de distancias entre centroides, el problema de que existan unidades de una zona que se encuentren contenidas en otra zona diferente a la suya, podría aparecer en las fronteras de las regiones, tal y como se observa en los gráficos siguientes.

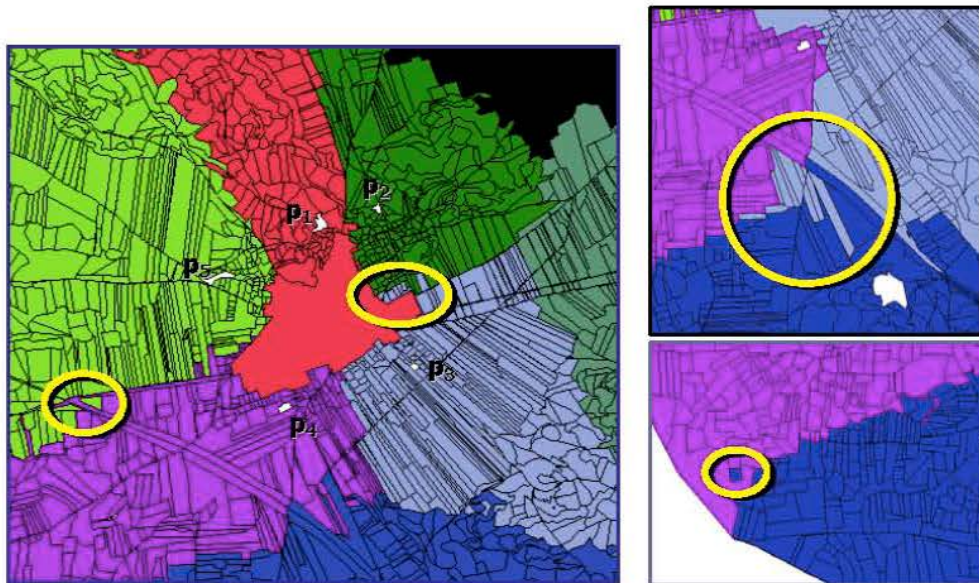


Figura 34. Anomalías en la definición de zonas por el uso de centroides en el cálculo del diagrama de Voronoi.

Ante este hecho, será necesario revisar el conjunto de unidades asignadas a cada zona y comprobar si la unión de sus geometrías forma un único recinto conexo, o varios recintos disjuntos. En este último caso, un posible método de solución consistiría en analizar qué otra zona contiene a cada uno de los recintos disjuntos de menor superficie, para asignárselos a ella y eliminarlos de la zona original.

En definitiva, *tanto el conjunto de puntos seleccionado para representar a las unidades básicas como la métrica utilizada en la medida de distancias entre dichos puntos, puede afectar a los resultados obtenidos con el diagrama de Voronoi*. Dado que los límites de las regiones han de adaptarse a los de sus unidades componentes, es necesario restituir las geometrías originales de área antes de construir dichas regiones. Para solucionar los problemas ocasionados por el uso de centroides, **la aplicación incluirá una fase adicional de revisión y ajuste de las zonas generadas con el diagrama de Voronoi**, de modo que el resultado final sea un recubrimiento exclusivo y excluyente del territorio con un único recinto conexo por cada generador.

3.4.1 Restricciones del algoritmo basado en un DVPAA

Tal y como se describió en la sección anterior, el modelo de solución que se presenta se basa en una **versión discreta del diagrama de Voronoi con peso aditivo adaptativo**. Este método permite la partición de un espacio bidimensional en regiones de un tamaño predeterminado, considerando tanto la posición como el peso de cada uno de los generadores. El espacio se reduce a los centroides o puntos representativos de las unidades básicas de área, entre los que se encuentran los generadores. En esta aplicación, el atributo de medida en que se expresa el tamaño de las regiones es la superficie forrajera equivalente (FAE), y los generadores corresponden a los centroides de aquellas unidades donde existen apriscos o majadas (lugar o recinto donde los pastores recogen el ganado para resguardarlo de la intemperie).

La generación de regiones de Voronoi, cuyo tamaño está prefijado inicialmente, consiste esencialmente en realizar el proceso inverso de los tradicionales diagramas de Voronoi con peso, donde el tamaño de la región es una variable dependiente. En el modelo propuesto, *los pesos de cada generador se calculan de forma iterativa, modificando el valor de distancia o proximidad a cada uno de los puntos del espacio*, hasta obtener las regiones esperadas. En este sentido, puede decirse que el problema pasa de la predicción a la optimización, *calculando regiones tales que su tamaño represente, lo mejor posible, un conjunto predeterminado de valores*.

El hecho de que las semillas o generadores sean un subconjunto de los puntos representativos de las unidades del territorio, condiciona la elección de la métrica empleada en el modelo propuesto. Realmente, éste podría considerarse una aproximación al **diagrama de Voronoi del camino más corto** por la función de medida de distancias que aplica. Este tipo de diagramas se usa en escenarios donde las semillas pertenecen a un subconjunto X del plano cerrado y limitado. Este conjunto no tiene que ser convexo, es decir, una línea recta entre dos puntos cualesquiera de X puede contener puntos que no pertenezcan a X, por lo que dicho conjunto también puede tener “agujeros” -recintos no pertenecientes a X que están contenidos en la frontera exterior de X-.

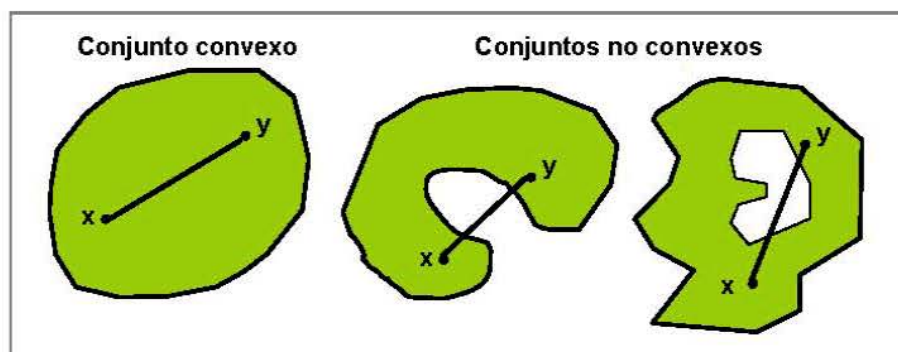


Figura 35. Ejemplo de conjuntos convexos y no convexos.

En estos diagramas la función de distancia se basa en la métrica del camino más corto (Okabe et al. 2000). Si se usa esta métrica, según la nomenclatura usada en la sección anterior (3.4), la distancia entre un par de vértices de V se calcula como la longitud del camino más corto entre dichos vértices, camino que ha de estar completamente contenido en V . Formalmente, sea $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ un conjunto de puntos diferentes en V , entonces la región de Voronoi del camino más corto asociada a $p_i \in P$, se define como $V_{sp}(p_i) = \{c \in V \text{ y } dsp(c, p_i) \leq dsp(c, p_j) \text{ para todo } j \neq i, 1 \leq i, j \leq m\}$. El diagrama de Voronoi del camino más corto es la colección $V_{sp} = \{V_{sp}(p_1), V_{sp}(p_2), \dots, V_{sp}(p_m)\}$ (Okabe et al. 2000).

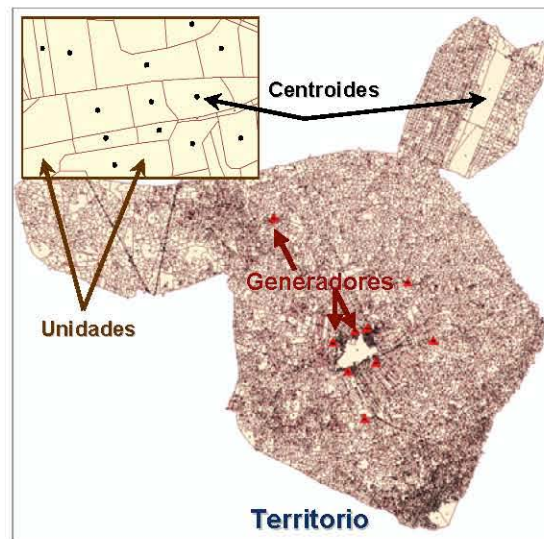


Figura 36. Ejemplo de distribución espacial de generadores en el conjunto de puntos que representan el territorio (recinto cerrado y limitado).

En el modelo propuesto, teniendo en cuenta la forma y dimensiones del territorio donde se pueden ubicar los generadores, se ha modificado la función $dw(p, p_i) = \|p - p_i\| - w_i$ por otra, donde la distancia euclídea $\|p - p_i\|$ entre p y p_i es sustituida por **la distancia del camino más corto $dsp(p, p_i)$** entre dichos puntos: $dw(p, p_i) = dsp(p, p_i) - w_i$. Para calcular el valor $dsp(p, p_i)$ se usará el grafo de adyacencia G del conjunto de unidades básicas X , donde:

- los vértices serán los centroides de las unidades básicas, $V = \{c_1, \dots, c_n\}$;
- las aristas representarán las adyacencias entre dos unidades cualesquiera con una frontera en común, y
- la longitud de una arista será la distancia euclídea entre los centroides de las unidades adyacentes.

La distancia $dsp(c_i, c_j)$ entre dos vértices cualesquiera c_i y c_j será el camino conexo más corto entre dichos vértices, definido por la suma de distancias euclídeas entre los centroides de las unidades adyacentes desde la unidad i hasta la j . Para calcular $dsp(,)$ se utilizará el algoritmo de Dijkstra.



En definitiva, el modelo de solución se funda en una versión discreta del diagrama de Voronoi con peso aditivo adaptativo, que usa una función de distancia basada en la métrica del camino más corto. Este modelo es un método de partición para un espacio euclídeo bidimensional discreto, definido por un conjunto finito $V = \{c_1, \dots, c_n\}$ de puntos, con $n = n^\circ$ de centroides de todas las unidades básicas¹², en m regiones z_i , una por cada punto generador p_i , $p_i \subset V$, caracterizado por su correspondiente peso w_i . Las regiones habrán de tener un tamaño $A(z_i)$ ¹³ prefijado inicialmente. El método propuesto establece las siguientes condiciones:

(0) **Integridad.** Cada punto c_j sólo puede pertenecer a una única región z_i .

(1) **Regiones inclusivas, I:** $p_i \in z_i$. Cada generador p_i está situado dentro de la región z_i que se forma a partir de él.

(2) **Conectividad.** Las regiones z_i han de ser recintos conexos.

(3) $\nabla p_i = 0$. La posición de un generador no puede cambiar y constituye un dato del problema.

(4) **Regiones de un tamaño prefijado.** Para cada región z_i se especificará un tamaño objetivo $A(z_i)$. El tamaño calculado $a(z_i)$ de cada región equivale al total del atributo de medida de las unidades básicas que contiene. Dado que el algoritmo es adaptativo, los valores $a(z_i)$ se obtienen por aproximaciones sucesivas, sin que pueda garantizarse que alcancen su valor objetivo. Por este motivo, todas las regiones habrán de tener un tamaño calculado de, al menos, el 90% del tamaño prefijado, sin que ninguna exceda este valor en más de un 10%: $0.9A(z_i) \leq a(z_i) \leq 1.1A(z_i)$.

Para garantizar la formación de regiones conexas se ha usado una **función de distancia**, $dw(c, p_i) = dsp(c, p_i) - w_i$, que calcule el camino más corto entre dos puntos del territorio a regionalizar, con la restricción de estar totalmente contenido en su interior. La distancia $dsp(c_j, p_i)$ entre un generador p_i y un punto cualquiera $c_j \in V$, será la longitud del camino más corto entre dichos puntos.

¹² En esta sección se utilizarán los siguientes términos genéricos para referirse a los específicos de la aplicación:

- unidades básicas: parcelas
- generador: centroide de parcela donde hay un aprisco
- regiones: polígonos de pasto

¹³ El tamaño de una región se determina a partir del atributo de medida FAE de sus unidades componentes, $A(z_i) \approx FAE_i$. En esta aplicación, el tamaño indicará la superficie forrajera necesaria para alimentar un rebaño de una cierta dimensión económica.

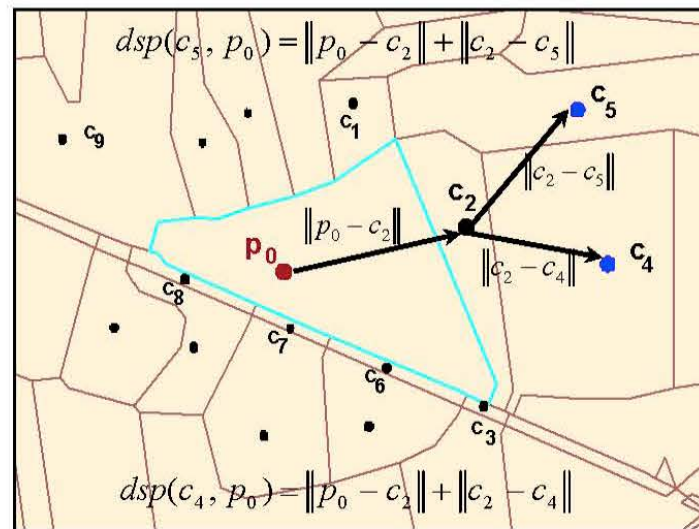


Figura 37. Ejemplo de cálculo de distancias $dsp(,)$ entre dos puntos.

Tal y como se ha descrito en la sección anterior (3.4), si se cumple la propiedad de “consistencia geodésica”, correspondiente a la métrica basada en el camino más corto, las regiones z_i formarán recintos conexos.

La figura siguiente muestra un ejemplo de las regiones obtenidas al usar una función $dw(c, p_i) = \|c - p_i\| - w_i$ que emplea distancias euclídeas $\|c - p_i\|$ en vez de distancias $dsp(,)$. Según puede observarse, en el diagrama de Voronoi calculado aparecen regiones no conexas.

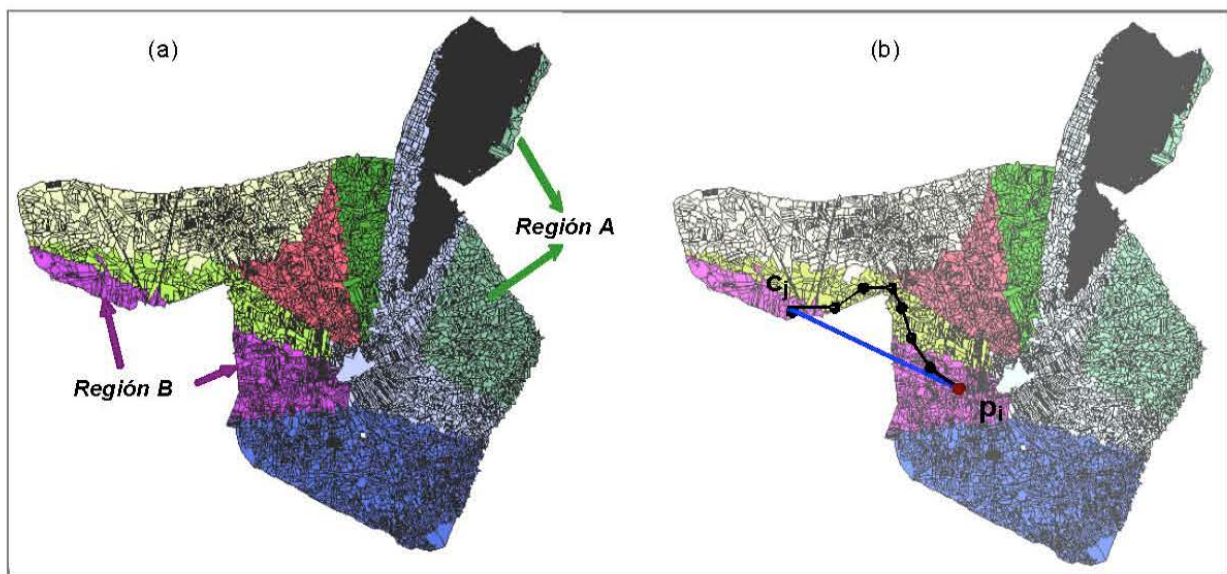


Figura 38. (a) Regionalización del municipio El Romeral, usando DVPA con una función $dw(,)$ que emplea distancias euclídeas. (b) Distancia euclídea entre p_i y c_j -color azul- frente a la distancia $dsp(c_j, p_i)$ -color negro-.

Teniendo en cuenta la condición (2), antes de resolver el diagrama de Voronoi en un proceso iterativo, será necesario calcular las distancias $dsp(,)$ entre todos y cada uno de los generadores especificados por el usuario y los centroides de las unidades del territorio considerado:

$$dsp(c_j, p_i), \forall 1 \leq j \leq n \text{ y } \forall 1 \leq i \leq m$$



Con esta finalidad se construirá un grafo de adyacencia, $G(V, A, l)$, de todas las unidades del territorio donde las aristas representarán las adyacencias entre dos unidades de área cualesquiera, con la condición de que sus geometrí­as tengan en común más de un punto. Según este criterio, la unidad 148 de la figura siguiente sería adyacente a las unidades 151, 130, 134, 145, 172 y 189, quedando descartadas la 126 y la 122, ya que su adyacencia se reduce a un punto.

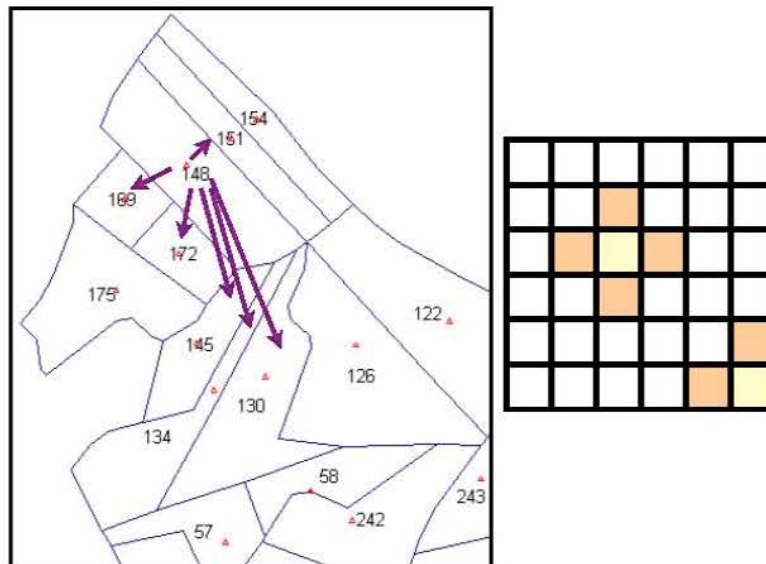


Figura 39. Criterio usado para determinar la adyacencia entre unidades básicas.

La utilización del algoritmo de Dijkstra en el cálculo de este tipo de distancias supone un proceso de una complejidad temporal $O(n \times m \times \log n)$, ya que se calcula el camino de cada generador al resto de unidades, siendo m el número de generadores y n el de unidades básicas.

Los valores $dsp(,)$ obtenidos se almacenarán en una estructura matricial que se utilizará como dato de entrada a la función de distancia $dw(,)$ del diagrama de Voronoi.

Un Diagrama de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo (DVPA), consiste básicamente en resolver repetidamente un tradicional DVPA, de forma que los pesos se actualizan en cada iteración según los pesos y el error de la iteración anterior. Este error se calcula en función de la diferencia entre los valores $A(z_i)$ prefijados y los valores $a(z_{k,i})$ obtenidos en la iteración k : $a(z_{k,i}) - A(z_i)$.

Los pesos toman un valor inicial, $w_{0,i} = 0$, que será actualizado en las sucesivas iteraciones $w_{k+1,i} = w_{k,i} + \Delta w_{k,i}$, $\forall k \geq 0, 1 \leq i \leq m$, donde $w_{k,i}$ es el peso del generador p_i en la iteración k , $\Delta w_{k,i}$ es el incremento del peso $w_{k,i}$ en la iteración k , $w_{k+1,i}$ es el peso del generador p_i en la iteración $k+1$ y m es el número de generadores. Se define: $a(z_{k,i})$ como el tamaño, expresado en unidades del atributo de medida, asignado al generador p_i en la iteración k ; y $A(z_i)$ como el tamaño objetivo, expresado en las mismas unidades, para el generador p_i . El valor de $\Delta w_{k,i}$ será positivo si el tamaño $a(z_{k,i})$ asignado al generador p_i es menor que el tamaño objetivo $A(z_i)$, y $\Delta w_{k,i}$ será negativo en caso contrario.



En el procedimiento de asignación de los incrementos de los pesos, $\Delta w_{k,i}$, para que los valores de $a(z_{k,i})$ se modifiquen en el sentido correcto, se debe tener en cuenta lo siguiente:

Si en una iteración k se aumenta el valor de un único peso, por ejemplo $w_{k,i}$, el correspondiente al generador p_i , entonces el valor de $a(z_{k,i})$ se incrementa disminuyendo los valores de $a(z_{k,j})$ para toda región z_j adyacente a la región z_i . Este hecho generaría un problema si, a su vez, alguno de los tamaños $a(z_{k,j})$ de estas regiones debe aumentar.

Para evitar, en la medida de lo posible, la aparición de estos casos, se ha propuesto que el incremento $\Delta w_{k,i}$, correspondiente al peso del generador p_i en la iteración k -ésima, se defina del modo siguiente:

$$\Delta w_{k,i} = \sum_{\substack{\forall j \neq 0 \\ z_j \text{ ady } z_i}}^m \left(\frac{a(z_{k,j}) - A(z_j)}{A(z_j)} - \frac{a(z_{k,i}) - A(z_i)}{A(z_i)} \right)$$

Asociado a este generador p_0 y a esta iteración k , se puede definir el error relativo

$$e_{k,i} = \frac{a(z_{k,i}) - A(z_i)}{A(z_i)}, \text{ de forma que la expresión anterior se reduce a la siguiente:}$$

$$\Delta w_{k,i} = \sum_{\substack{\forall j \neq 0 \\ z_j \text{ ady } z_i}}^m (e_{k,j} - e_{k,i})$$

Dado que el algoritmo diseñado es de carácter heurístico, para no aumentar la complejidad en su implementación, se puede obviar la condición de adyacencia entre regiones $(z_i \text{ ady } z_j)$, de modo que la fórmula de cálculo de los incrementos sería:

$$\Delta w_{k,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m (e_{k,j} - e_{k,i}), \text{ donde } \Delta w_{k,i} \text{ es el incremento del peso del generador } p_i \text{ en la iteración}$$

k .

Una de las propiedades de los DVPA es la *posibilidad de que se formen regiones vacías*, de forma que si $w_j - w_i > \|p_j - p_i\| \quad \forall 1 \leq j \leq m \quad i \neq j$, entonces la celda de Voronoi de p_i es un conjunto vacío. Para evitar que la diferencia entre dos pesos cualesquiera supere la distancia entre sus generadores, con la consiguiente desaparición de una de las regiones, se dividirá el valor de cada una de las diferencias $(e_{k,j} - e_{k,i})$ por la distancia $dsp(p_i, p_j)$ entre dichos generadores:

$$\Delta w_{k,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_{k,j} - e_{k,i})}{dsp(p_i, p_j)}$$



Finalmente, para controlar la velocidad de convergencia del algoritmo y evitar la posible desaparición de regiones, se introducirá un *parámetro global L de ajuste* del proceso:

$$\Delta w_{k,i} = L \times \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_{k,j} - e_{k,i})}{dsp(p_i, p_j)} \quad [1]$$

En resumen, según la expresión [1], se propone calcular el valor de $\Delta w_{k,i}$ proporcional a las siguientes cantidades:

- (1) La suma de las diferencias ponderadas entre los errores relativos de cada generador respecto del generador i, usando como factor de ponderación el inverso de la distancia $dsp(p_i, p_j)$ que los separa.
- (2) Un parámetro L de ajuste positivo y no nulo.

Teniendo en cuenta los criterios expuestos, se obtiene la *fórmula para el cálculo de los pesos adaptativos*, que es una de las aportaciones de esta investigación:

$$\Delta w_{k+1,i} = w_{k,i} + \Delta w_{k,i} = w_{k,i} + L \times \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_{k,j} - e_{k,i})}{dsp(p_i, p_j)} \quad [2]$$

La ecuación [2] se aplica de forma iterativa a cada generador para calcular las correspondientes distancias ponderadas $dw(c, p_i)$ a los puntos del territorio, hasta que se cumple uno de los dos criterios de parada:

- a) el proceso se realiza un número máximo de iteraciones T, para evitar que pueda quedar atrapado en un bucle infinito, ó
- b) el valor de un parámetro que mide la bondad del ajuste alcanza un límite definido por el usuario.

En relación con este último punto, se necesita establecer una medida de precisión que indique el grado de ajuste conseguido. El tamaño de las regiones debe ser igual a los valores objetivo predefinidos, de forma que sea posible detener el proceso cuando el parámetro de medida alcance un cierto valor, o bien cuando se consiga que todas las diferencias $|a(z_i) - A(z_i)|$ estén por debajo de un intervalo de tolerancia.

Inicialmente, como medida de la bondad del ajuste, se pensó utilizar la suma de los cuadrados de

los errores relativos: $E_k = \sum_{i=1}^m \left(\frac{(a(z_{k,i}) - A(z_i))}{A(z_i)} \right)^2 = \sum_{i=1}^m (e_{k,i})^2$, donde E_k es el valor de la medida

de error en la iteración k. En este caso, el proceso se detendría tras realizar una iteración k si se verifica la desigualdad: $E_k < \epsilon$, donde ϵ es un umbral de tolerancia elegido por el usuario, por ejemplo: $\epsilon=0.05$ ó $\epsilon=0.01$.



El valor asignado a ϵ se basaría fundamentalmente en la experiencia y en las pruebas realizadas. No obstante, ϵ representa el intervalo de tolerancia en el que se considera válida la solución global obtenida, es decir, se acepta el tamaño ($a(z_i)$) de todas y cada de las regiones sin considerar las diferencias de cada una de ellas con su valor objetivo ($A(z_i)$).

Teniendo en cuenta este hecho, se descartó esta medida de la bondad del ajuste para usar otra basada en los valores absolutos de los errores relativos de las regiones:

$$E_k = \max \left\{ \left| \frac{(a(z_{k,i}) - A(z_i))}{A(z_i)} \right|, \quad 1 \leq i \leq m \right\} = \max \{ |e_{k,i}|, \quad 1 \leq i \leq m \}.$$

En este caso, se ha de verificar la desigualdad: $E_k \leq 0.10$. La nueva condición de parada implica que el valor absoluto de los errores $e_{k,i}$ sea inferior al diez por ciento: $|e_{k,i}| \leq 0.10, 1 \leq i \leq m$, es decir, el proceso se detendría tras realizar una iteración k si todas las regiones tienen un tamaño de, al menos, el 90% del valor especificado y ninguna excede en más de un 10% dicho valor: $0.9A(z_i) \leq a(z_i) \leq 1.1A(z_i), 1 \leq i \leq m$.

El porcentaje elegido como umbral puede variar según las características del problema específico al que se aplique. En el caso de los sistemas extensivos de tipo cereal-ovino, el atributo de medida (FAE) de una unidad se calcula en función de su superficie y del coeficiente forrajero de su cultivo. La precisión con que puede obtenerse la superficie de una unidad es muy superior a la del coeficiente, por lo que, comparativamente, la contribución del primer factor al error del atributo de medida puede considerarse despreciable. El valor asignado a un coeficiente forrajero se basa en la disponibilidad de nutrientes asociados a un tipo de cultivo. La superficie sobre la que se extiende un cultivo no es totalmente homogénea, existiendo una variabilidad de hasta el 10% en la concentración de nutrientes. Por este motivo, el máximo error admisible en el atributo de medida sería de aproximadamente el 10%, igual al de su coeficiente forrajero. Dado que el tamaño (FAE) de las regiones se calcula como la suma de los valores del atributo de medida de sus unidades, se puede considerar igualmente válido para esta variable un error máximo relativo del 10%, $|e_i| \leq 0.10, 1 \leq i \leq m$.

Finalmente, ante la necesidad de calibrar el parámetro L , incluido en la fórmula para el cálculo de los pesos adaptativos, en el apartado siguiente se comentan los métodos utilizados para asignar un valor a dicho parámetro. La disyuntiva se plantea entre elegir una constante numérica o un valor de L que se autoajuste en cada iteración, en función los resultados obtenidos previamente.



3.4.2 *Ajuste del modelo: estimación del parámetro de control L*

El parámetro L , introducido en las ecuaciones [1] y [2], tiene por función controlar la velocidad de convergencia del algoritmo. La elección del valor de L puede condicionar dicha velocidad y, por tanto, el número óptimo de iteraciones a realizar. La parada del proceso de cálculo determina la solución final, solución que podría ser susceptible de mejora si los pesos pudieran ser ajustados con mayor precisión en iteraciones posteriores.

Con el propósito de elegir adecuadamente este parámetro, se ha realizado un experimento con dos versiones del algoritmo, según que el valor de L sea:

- a) fijo,
- b) adaptativo.

En la versión inicial del algoritmo, L se diseñó como un coeficiente cuyo valor había que fijar experimentalmente. Para ello se realizaron una serie de pruebas asignando a L diversas constantes numéricas. El objetivo del experimento era determinar si existía un valor fijo de carácter “universal”, válido en cualquiera de los problemas para los que se ha diseñado esta aplicación. Las conclusiones del estudio realizado son las siguientes:

- 1) En líneas generales, ***al aumentar el valor de L se acelera la velocidad de convergencia del ajuste de los pesos y, por tanto, de la solución***, reduciéndose el número de iteraciones y el tiempo de cálculo del diagrama de Voronoi.

También se constató que, en las particiones donde existe una solución satisfactoria y la configuración geométrica de los generadores es adecuada, las zonificaciones obtenidas con diversos valores de L son muy similares. Por este motivo, las diferencias entre los errores relativos de cada región en dichas particiones son mínimas.

En un territorio de aproximadamente 10000 unidades, el número de iteraciones que requiere una partición de 3 regiones -ejemplo (a), figura 40- puede variar de un máximo de 97 a un mínimo de 3, para valores de $L = 5000$ y $L = 300000$ respectivamente. En el ejemplo (b) de la figura 41, en un territorio de 17539 unidades, el número de iteraciones que requiere una partición de 6 zonas puede variar de 3151 a 23, para valores de $L = 1000$ y $L = 200000$ respectivamente.

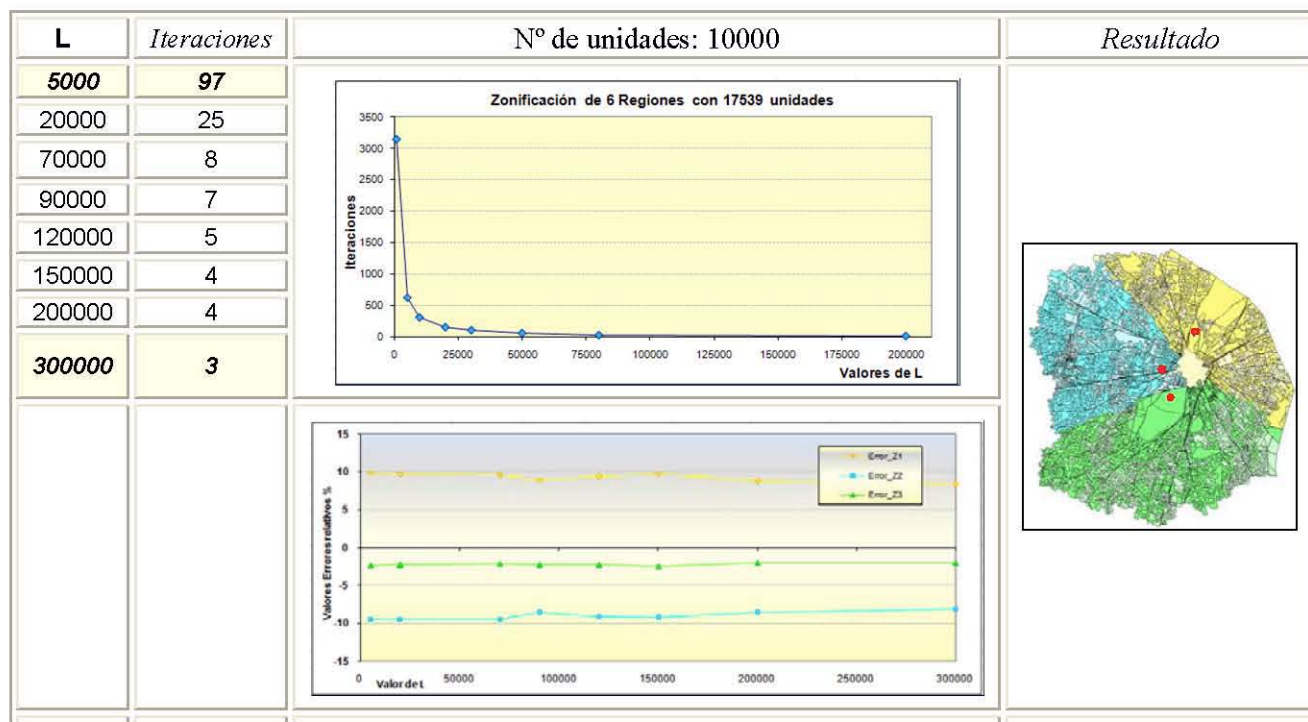


Figura 40. Ejemplo (a): Partición de 10000 unidades en 3 regiones usando diferentes valores del parámetro L.

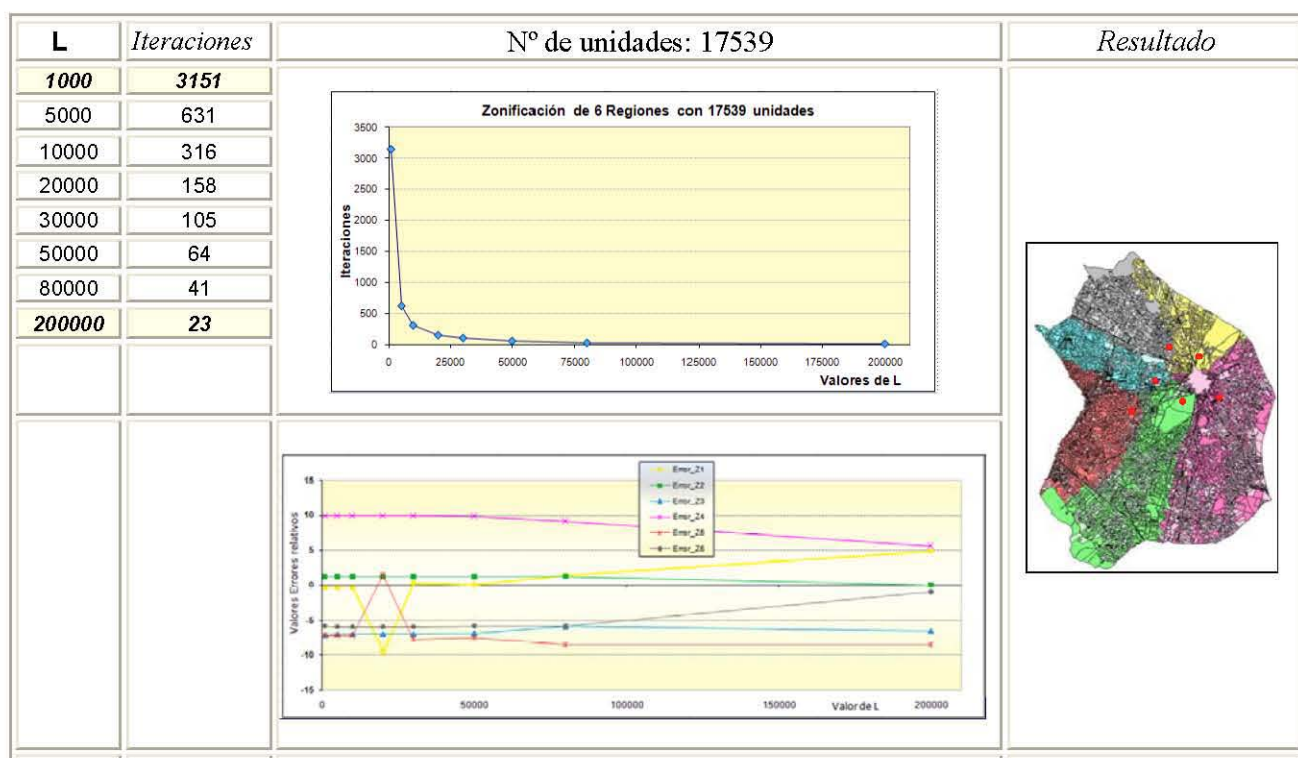


Figura 41. Ejemplo (b): Partición de 17539 unidades en 6 regiones usando diferentes valores del parámetro L.



No obstante, tal y como se observa en la figura siguiente, esta tendencia de aumento de velocidad en la convergencia de la solución no es concluyente, ya que se presentan múltiples excepciones. En las particiones b (5 zonas) y d (9 zonas), el número de iteraciones puede llegar a crecer indefinidamente cuando el valor de L es superior a 5000 o a 50000 respectivamente. En ninguno de estos casos el proceso converge en una zonificación que se ajuste a los criterios establecidos. El valor de L puede condicionar el funcionamiento del algoritmo, ya que reduce el espacio de búsqueda al descartar, sin analizar, candidatos que pueden ser una solución del problema.

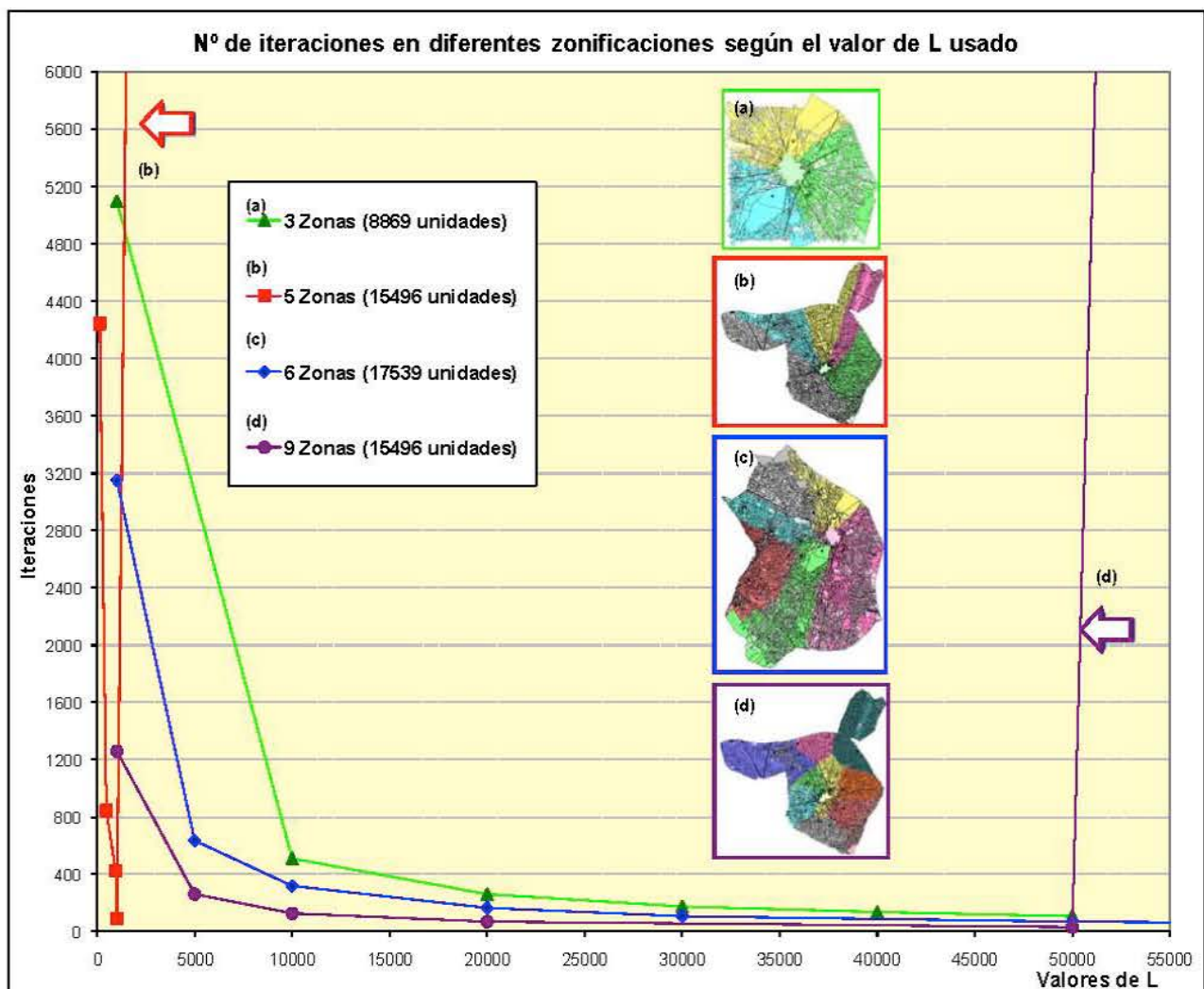


Figura 42. Variación del número de iteraciones en una zonificación usando diferentes valores de L.



2) Existen configuraciones geométricas de los generadores donde, si se usan *valores de L superiores a una determinada constante numérica, el proceso de cálculo se hace inestable*.

		Nº de unidades: 562 / 4 Regiones				Ejemplo (1)
L	Iteraciones	Error z_1	Error z_2	Error z_3	Error z_4	Resultado
1000	562	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
5000	114	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
15000	40	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
30000	21	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
50000	15	-9,56%	2,57%	-8,08%	-0,93%	
70000	9845	-7,9%	0,69%	4,13%	2,49%	
80000	50000	19,56%	-1,24	-26,5	2,75%	

		Nº de unidades: 15496 / 5 Regiones					Ejemplo (2)
L	Iteraciones	Error z_1	Error z_2	Error z_3	Error z_4	Error z_5	Resultado
50	8483	-0.12%	1.89%	-9.94%	1.82%	3.98%	
100	4238	-0.12%	1.89%	-9.94%	1.82%	3.98%	
500	840	-0.12%	1.92%	-9.94%	1.79%	3.98%	
1000	419	-0.12%	1.89%	-9.94%	1.82%	3.98%	
5000	87	-0.29%	1.90%	-9.75%	1.79%	3.99%	
10000	50000	1.93%	-0.24%	-62.27%	-0.61%	38.94%	

Figura 43. Particiones espaciales de 4 y 5 regiones (ejemplos 1 y 2 respectivamente), donde el uso de ciertas constantes para el parámetro L hace inestable el proceso de cálculo, generando una solución no satisfactoria.

En los ejemplos anteriores, a partir de un cierto valor de L ($L \geq 80000$, ejemplo (1), y $L \geq 10000$, ejemplo (2)) no se acelera el proceso de convergencia de la solución, sino que se produce un ajuste inicial muy rápido de los valores de los pesos, de forma que estos empiezan a oscilar, produciendo el mismo efecto en los valores de los errores relativos de cada región. En las figuras siguientes se muestra la variación de estos errores en las particiones de los ejemplos 1 y 2, para valores de $L = 80000$ y $L = 10000$ respectivamente. En el primer caso, mientras los errores de las regiones 1, 3 y 4 empiezan a oscilar entre la cuarta y séptima iteración, el de la otra región lo hace a partir de la iteración decimoséptima. En el ejemplo 2, a partir de la iteración decimotercera empiezan a oscilar solamente los errores de las zonas 3 (azul) y 5 (gris), mientras el resto tiende a converger durante del proceso de cálculo.

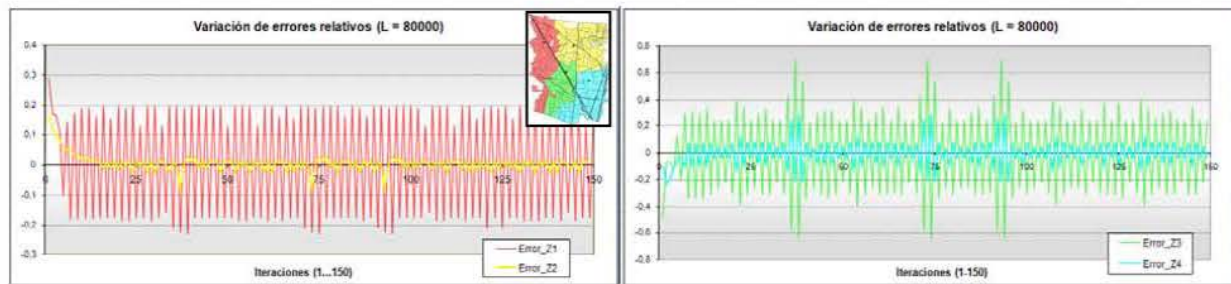


Figura 44. Variación de los errores relativos de las regiones del ejemplo 1 en sucesivas iteraciones ($L = 80000$).

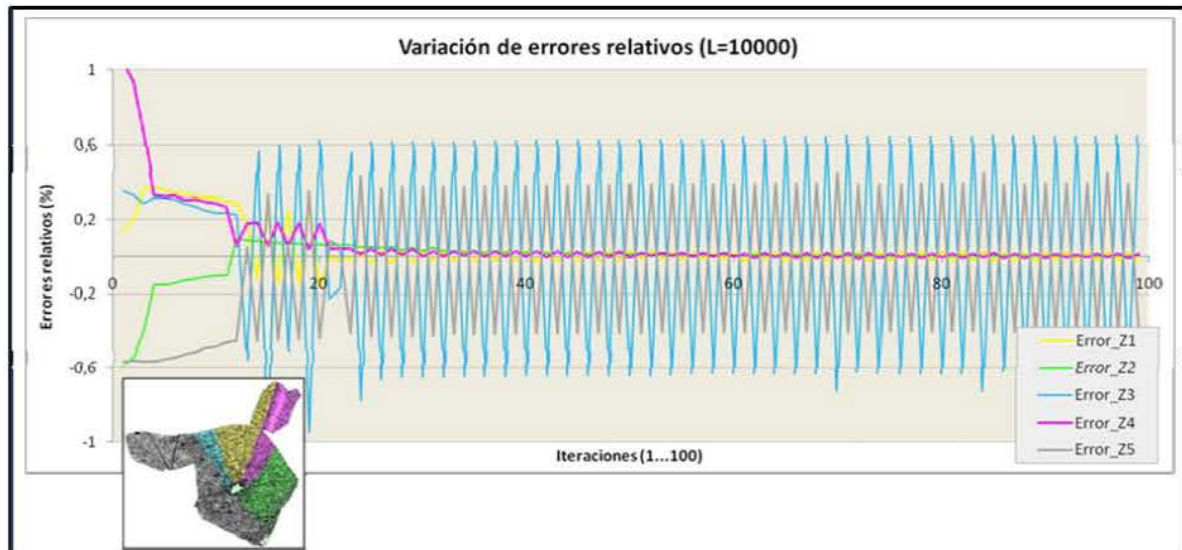


Figura 45. Variación de los errores relativos de las regiones del ejemplo 2 en sucesivas iteraciones ($L = 10000$).

La rápida oscilación en los valores de los pesos (y de los errores) impide alcanzar una solución satisfactoria, tal y como se observa en el gráfico siguiente que corresponde al ejemplo 1. Los errores relativos finales de cada región son máximos en la partición realizada con el valor de L ($L = 80000$) que hace inestable el proceso de cálculo.

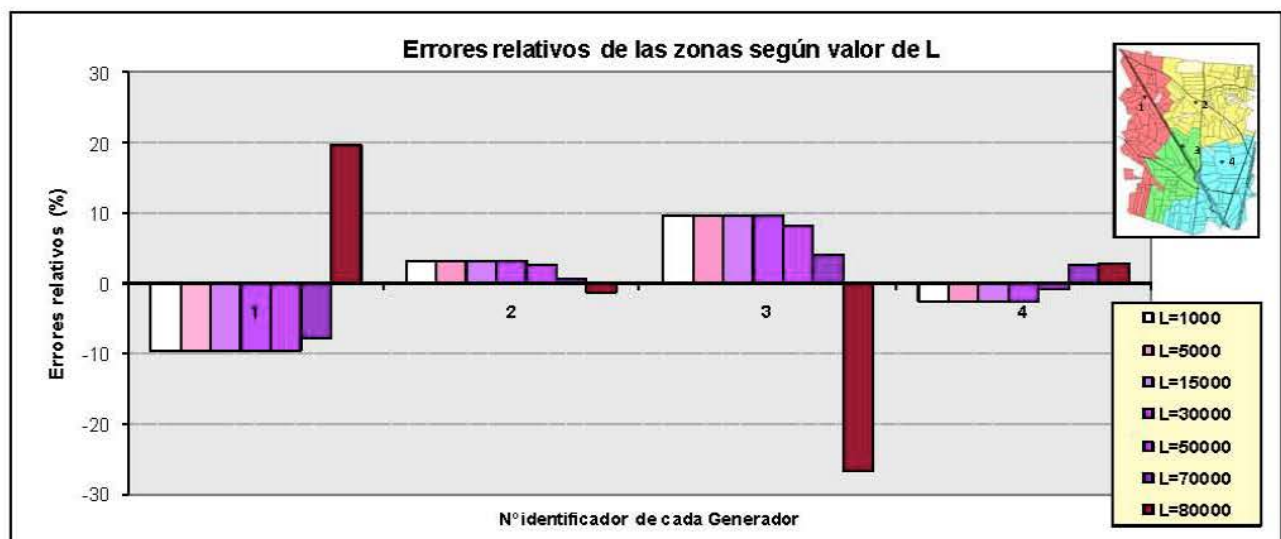


Figura 46. Errores finales relativos de las regiones del ejemplo 1, para diferentes valores del parámetro L .



En este otro ejemplo se vuelve a constatar la influencia del parámetro L en la convergencia del proceso de cálculo. En esta partición de 9 zonas se muestran: (a) los errores obtenidos en los resultados según el valor de L utilizado; (b) gráfico de la variación de los errores en sucesivas iteraciones del proceso de cálculo, usando una constante ($L=5000$) que genera una zonificación que cumple los criterios establecidos; (c) gráfico de variación de los errores, usando un valor ($L=80000$) que hace inestable el proceso y, consecuentemente, no genera una solución. Según se observa en (a), cuando $L > 50000$ el modelo no converge por el ajuste de los errores de las zonas 1, 2 y 3 (colores amarillo, verde y azul). La rápida variación de los pesos, tanto mayor según aumenta el valor de L , produce una oscilación en la asignación de unidades a las zonas 1 (amarilla) y 2 (verde). Para $L=60000$, la zona 1 pierde unidades que son asignadas a la zona 2, de forma que el error de la primera es de -34.6 % frente al 56.5 % de la segunda. Para $L=80000$ esta disparidad aumenta en sentido inverso y la zona 2 prácticamente desaparece, su error pasa a ser del -99.8 % frente al 65.4 % de la zona 1.

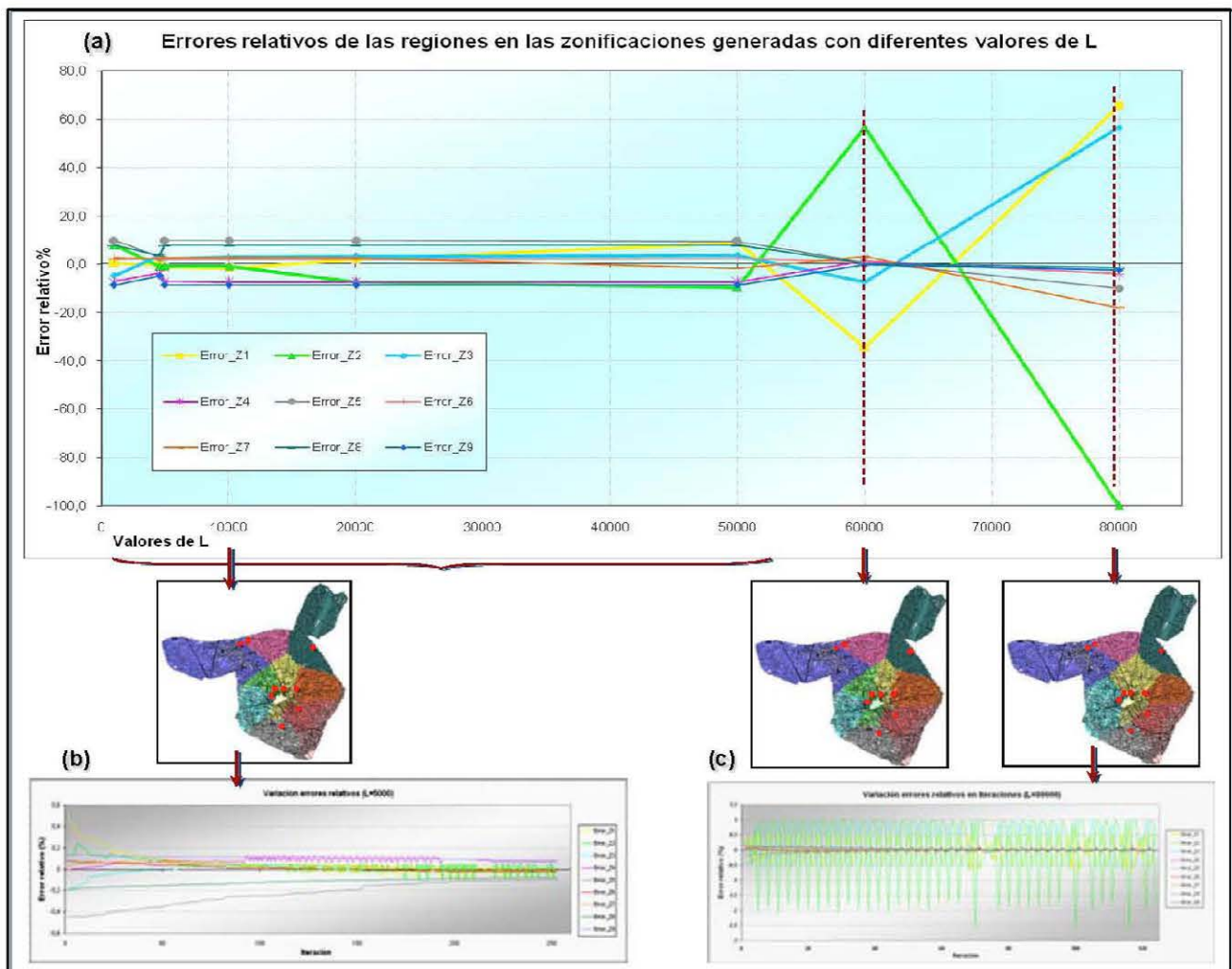


Figura 47. Variación de los errores relativos obtenidos en una zonificación usando diferentes valores de L .



En las pruebas realizadas se ha hecho evidente que el parámetro L no sólo es sensible a la configuración geométrica de los generadores, sino también a las distancias que los separan, por lo que el valor que convierte el proceso en inestable depende de cada caso.

3) *Imposibilidad de encontrar una constante numérica de carácter “universal”*, válida en cualquiera de los problemas para los que se ha diseñado esta aplicación. Tras realizar varias pruebas, se observó que el valor más adecuado en cada caso podía oscilar en un intervalo muy amplio [1000...300000], en función de la configuración geométrica y número de generadores, así como del número de unidades del conjunto de datos.






L_{\min}	<i>Iteraciones</i>		L_{\max}	<i>Iteraciones</i>	Nº de unidades	Regiones	<i>Resultado</i>
50	8483		5000	87	15496	5	
1000	5097		60000	87	8869	3	
1000	562		70000	9845	562	4	
1000	3151		200000	23	17539	6	
5000	97		300000	3	10000	3	

Figura 48. Nº máximo y mínimo de iteraciones para valores del parámetro L que generan una zonificación válida.

Por los motivos expuestos, se descarta el uso de L como un factor constante y se propone su sustitución por un parámetro adaptativo o dinámico, cuyo valor dependerá, en cada iteración, de la configuración geométrica de las unidades básicas y del grado de ajuste de las regiones a su tamaño objetivo. Para ello se calculará, por un lado, la mínima distancia euclídea que separa dos cualesquiera unidades adyacentes del territorio o zona de estudio y, por otro, la suma ponderada de las diferencias entre los errores relativos de cada generador respecto del resto. El valor asignado a L en cada iteración será el mínimo valor absoluto del cociente de estos dos factores.



Formalmente, si se denomina D_{\min} a la mínima distancia euclídea entre dos cualesquiera unidades adyacentes, $dsp(p_i, p_j)$ a la distancia del camino más corto entre los generadores p_i y p_j , y $e_{k,i}$ al error relativo del generador p_i en la iteración k , se tienen las expresiones siguientes:

$$(a) \text{ Sum}_{k,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_{k,i} - e_{k,j})}{dsp(p_i, p_j)}, \text{ suma, en la iteración } k, \text{ de las diferencias entre los}$$

errores relativos del generador p_i respecto a los demás, usando como factor de ponderación el inverso de la distancia $dsp(,)$ que los separa.

$$(b) \text{ Vaux}_{k,i} = \left| \frac{D_{\min}}{\text{Sum}_{k,i}} \right|, \text{ valor absoluto, en la iteración } k, \text{ de la razón entre la mínima}$$

distancia euclídea entre unidades adyacentes y la variable $\text{Sum}_{k,i}$ correspondiente al generador p_i .

$$(c) L_k = \text{Min} \left\{ \left| \frac{D_{\min}}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_{k,i} - e_{k,j})}{dsp(p_i, p_j)}} \right|, 1 \leq i \leq m \right\},$$

es decir, $L_k = \text{Mínimo}(\text{Vaux}_{k,i})_{1 \leq i \leq m}$, valor del parámetro L en la iteración k .

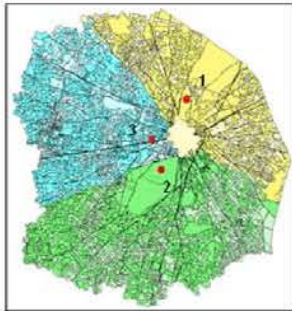
Al utilizar la expresión anterior, se garantiza también que los resultados obtenidos son independientes de la elección de las unidades de los datos, es decir, las unidades correspondientes a las distancias. Si se aplica la fórmula (c) para calcular L , este parámetro de ajuste dinámico tendrá las mismas unidades que las distancias usadas en el proceso.


Si en la ecuación [2] se sustituye la fórmula de L , se obtiene la **ecuación definitiva para calcular los pesos adaptativos**:

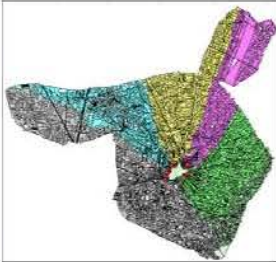
$$\Delta w_{k+1,i} = w_{k,i} + \Delta w_{k,i} = w_{k,i} + \text{Min} \left\{ \left| \frac{D_{\min}}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_{k,i} - e_{k,j})}{dsp(p_i, p_j)}} \right|, 1 \leq i \leq m \right\} \times \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_{k,j} - e_{k,i})}{dsp(p_i, p_j)} \quad [3]$$

Por último, para corroborar la imposibilidad de encontrar una constante numérica de carácter “universal”, se adjuntan los datos de varias zonificaciones en las que se indica, por un lado, la constante numérica que genera la solución de menor error (color azul) y por otro, la constante que mejor se ajusta a la solución dada por el parámetro adaptativo L (negrita).



		Nº de unidades: 8021 / Nº de regiones: 3			Caso 1
L constante	Iteraciones	Error z_1	Error z_2	Error z_3	
5000	97	9.85 %	-9.39%	-2.35%	
10000	49	9.85 %	-9.39%	-2.35%	
15000	33	9.83 %	-9.37%	-2.35%	
20000	25	9.76%	-9.37%	-2.35%	
70000	8	9.59%	-9.36%	-2.03%	
90000	7	9.01%	-8.54%	-2.22%	
120000	5	9.39%	-9.03%	-2.14%	
150000	4	9.76%	-9.19%	-2.46%	
200000	4	8.79%	-8.52%	-1.94%	
300000	3	8.39 %	-8.01%	-2.01%	
L Adaptativo	59	9.83 %	-9.37%	-2.35%	

		Nº de unidades: 562 / Nº de regiones: 4				Caso 2
L constante	Iteraciones	Error z_1	Error z_2	Error z_3	Error z_4	
1000	562	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
5000	114	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
15000	40	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
30000	21	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	
50000	15	-9,56%	2,57%	-8,08%	-0,93%	
70000	9845	-7,9%	0,69%	4,13%	2,49%	
L Adaptativo	133	-9,56%	3,13%	9,57%	-2,59%	

		Nº de unidades: 15496 / Nº de regiones: 5					Caso 3
L constante	Iteraciones	Error z_1	Error z_2	Error z_3	Error z_4	Error z_5	
50	8483	-0.12%	1.89%	-9.94%	1.82%	3.98%	
100	4238	-0.12%	1.89%	-9.94%	1.82%	3.98%	
500	840	-0.12%	1.92%	-9.94%	1.79%	3.98%	
1000	419	-0.12%	1.89%	-9.94%	1.82%	3.98%	
5000	87	-0.29%	1.90%	-9.75%	1.79%	3.99%	
L Adaptativo	488	0.31%	1.89%	-9.84%	1.24%	3.98%	


		Nº de unidades: 17539 / Nº de regiones: 6						Caso 4
L constante	Iteraciones	Error z_1	Error z_2	Error z_3	Error z_4	Error z_5	Error z_6	
1000	3151	0.33%	-1.21%	7.10%	-9.97%	7.27%	5.84%	
5000, 10000	631, 316	0.33%	-1.21%	6.96%	-9.97%	7.27%	5.93%	
20000	158	9.51%	-1.21%	6.96%	-9.97%	-1.46%	5.93%	
30000	105	-0.27%	-1.21%	6.96%	-9.97%	7.85%	5.93%	
50000	64	-0.06%	-1.19%	6.88%	-9.82%	7.56%	5.81%	
80000	41	-1.45%	-1.27%	5.90%	-9.11%	8.46%	5.81%	
L Adaptativo	1520	0.33%	-1.21%	6.96%	-9.97%	7.27%	5.93%	

Figura 49. Comparación entre los resultados generados con valores constantes de L frente al uso de un parámetro adaptativo.



Cuando el parámetro L es adaptativo, la evolución de su valor en cada iteración va asociada a la de los pesos y errores de las diferentes zonas. El valor de L depende de la mínima distancia euclídea que separa dos unidades cualesquiera adyacentes del territorio y de la suma ponderada de las diferencias entre los errores relativos de cada generador respecto del resto. El valor inicial, en la primera iteración, será diferente en cada problema y, por norma general, irá aumentando progresivamente durante el cálculo. Este comportamiento responde a una tendencia de ajuste y disminución paulatina de los errores de las zonas. Cuando se producen oscilaciones en el ajuste de estos errores, L experimenta un patrón de variación similar, de forma que su comportamiento ascendente continuo se detiene y oscila alrededor del valor alcanzado hasta ese momento.

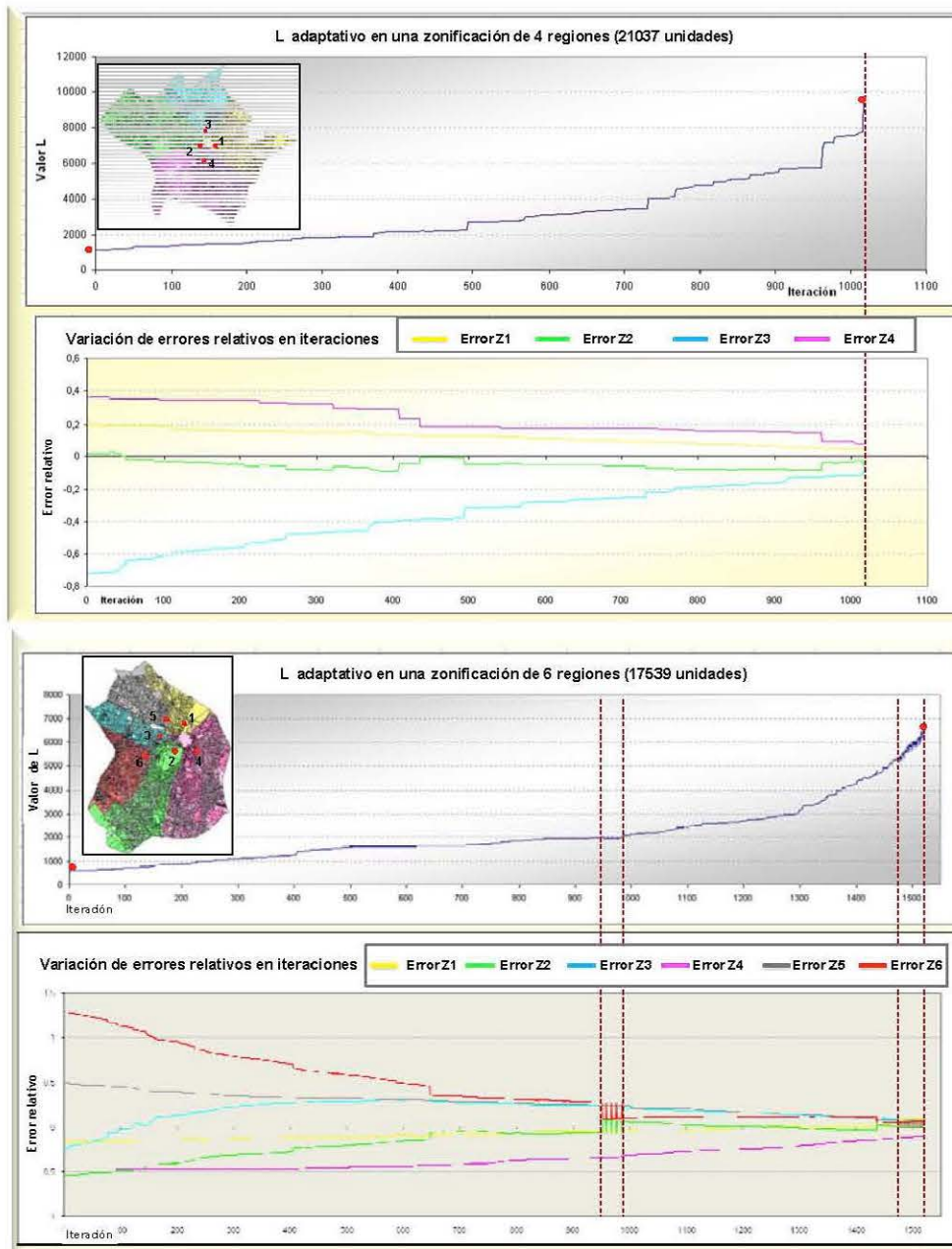


Figura 50. Variación del parámetro L y de los errores relativos de las regiones durante el proceso de cálculo (I).

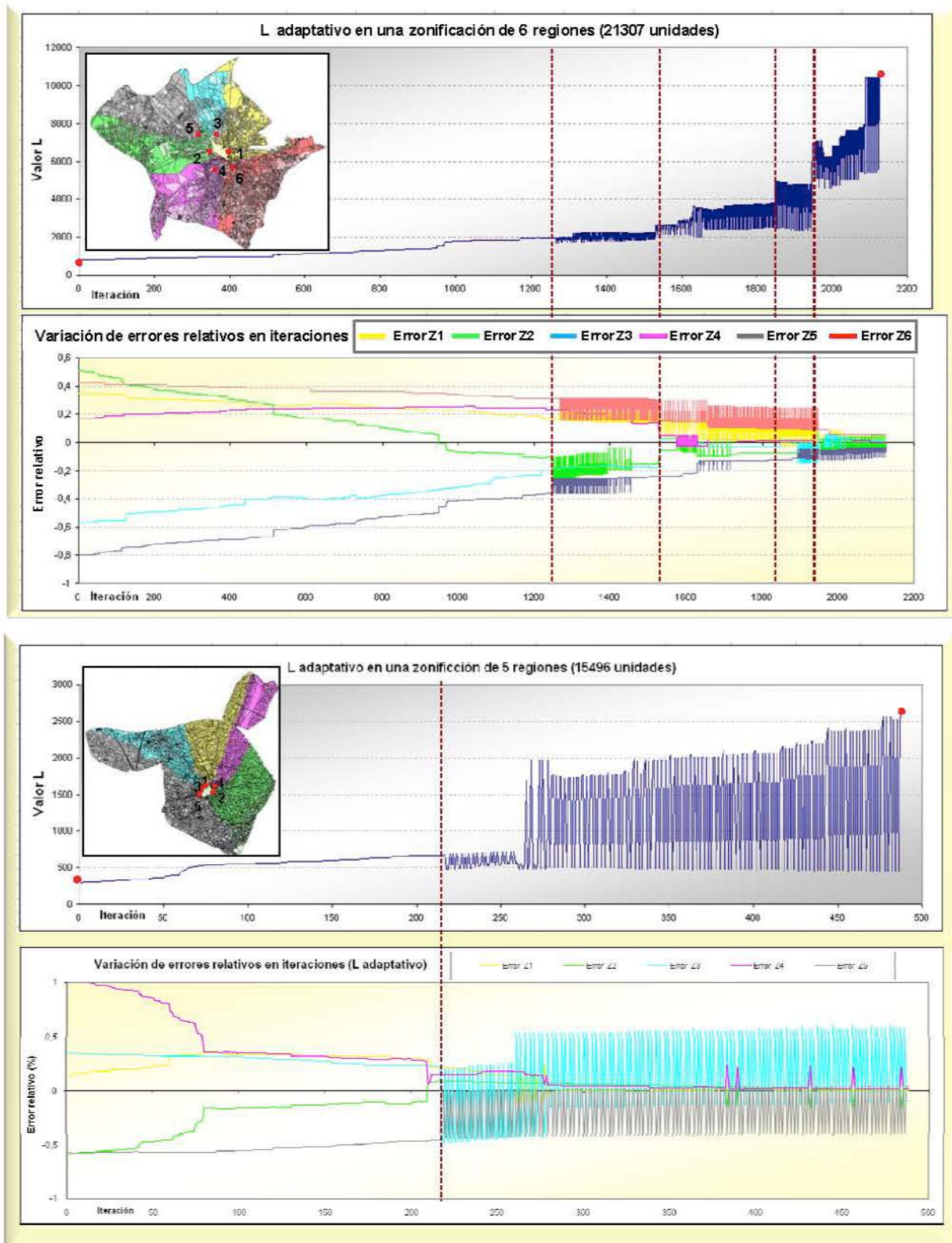


Figura 51. Variación del parámetro L y de los errores relativos de las regiones durante el proceso de cálculo (II).



3.4.3 Implementación del algoritmo

La aplicación desarrollada está escrita en el lenguaje de programación C#, en el entorno de desarrollo .NET y, aunque incorpora la biblioteca de Objetos COM (Component Object Model) de GeoMedia Professional v.6.1, funciona con independencia de esta plataforma, utilizando sus objetos para acceder a los recursos y funciones de análisis propias de los Sistemas de Información de Geográfica. Esta misma aplicación podría transformarse en una librería dinámica (*.dll) e integrarse en el entorno de GeoMedia Professional, mejorando su funcionalidad con una nueva herramienta de segmentación espacial. El vínculo que une la aplicación con este programa es el formato de los datos de entrada y salida, que corresponde al de una base de datos con información espacial vectorial gestionada por dicho programa.

El conjunto de datos de entrada a la aplicación estará formado por el total de unidades básicas del área de estudio, almacenadas en una tabla de una base de datos Access generada con el programa GeoMedia Professional.

El usuario ha de seleccionar las unidades que tendrán la consideración de semillas o generadores (p_i) en el cálculo de los diagramas de Voronoi. Por cada semilla, hay que especificar el valor del tamaño¹⁴ que ha de tener su correspondiente región. El programa mostrará las regiones resultantes, tras realizar los procesos que a continuación se describen:

- Cálculo y almacenamiento de las coordenadas de los centroides c_j de todas las unidades (x_j).
- Generación de un grafo $G = (V, A, I)$, donde los vértices representan las unidades básicas y las aristas representan las adyacencias existentes entre dos unidades cualesquiera. No se consideran adyacentes las unidades que comparten un único punto de sus límites o fronteras.
- Cálculo y almacenamiento de las distancias $dsp(,)$ entre vértices del grafo, utilizando el algoritmo de Dijkstra. Sólo se calculan las distancias de las unidades a cada uno de los generadores, ya que son las que se utilizarán en la construcción del diagrama de Voronoi. Este proceso garantiza que al ir de una unidad cualquiera a uno de los generadores, siempre se recorre un camino por el interior del territorio.
- Proceso iterativo de cálculo de los diagramas de Voronoi con peso aditivo adaptativo, usando un algoritmo que recibe los siguientes datos de entrada:
 - El grafo de adyacencia $G = (V, A, I)$ de todas las unidades básicas del territorio.
 - El número m de regiones a formar.
 - El subconjunto $P = \{p_1, \dots, p_m\}$, $P \subset V$, de las m semillas. De cada semilla o generador p_i se conoce el tamaño $A(z_i)$ de la región a la que dará lugar.

¹⁴ En esta aplicación, el tamaño se expresa en unidades de superficie forrajera equivalente (FAE).



- De cada unidad básica se dispone de:
 - » Sus datos espaciales (geometría de área).
 - » Las coordenadas cartesianas de su centroide c_j .
 - » El valor de su atributo de medida¹⁵ (a_j).
 - » Su grado de accesibilidad¹⁶. Este atributo es de carácter booleano y puede tomar el valor 0 (no accesible) y 1 (accesible).
 - » Su nivel de aprovechamiento¹⁷, es decir, si con independencia del valor de su atributo de medida contribuye o no al tamaño de la región. Este atributo es de carácter booleano y puede tomar el valor 0 (no aprovechable) y 1 (aprovechable). El programa asigna inicialmente los valores de aprovechamiento en función del atributo de medida de cada unidad¹⁸:
$$a_j > 0 \Rightarrow \text{aprovechamiento} = 1, \quad a_j = 0 \Rightarrow \text{aprovechamiento} = 0$$
Estos valores serán revisados y actualizados en la fase 4.1 del algoritmo.
- Las distancias $\text{dsp}(c_j, p_i)$ entre un centroide (c_j) y un generador (p_i) cualquiera.
- El número máximo de iteraciones del algoritmo, T .

Las etapas del algoritmo son las siguientes:

1. Iniciar las variables:

- a) Los pesos de los generadores: $w_i := 0, \forall 1 \leq i \leq m$.
- b) El número de iteraciones realizadas: $I := 0$.
- c) La mínima distancia euclídea que separa dos cualesquiera unidades adyacentes del territorio: D_{\min} .

2. Núcleo del algoritmo. En cada iteración:

- a) Asignar $z_i := \phi, \forall 1 \leq i \leq m$

¹⁵ En esta aplicación, el atributo de medida se expresa en las mismas unidades que el tamaño de la región (FAE). El valor de este atributo puede ser mayor o igual a cero. Las unidades cuyo valor sea cero, no contribuirán al tamaño de la región donde se encuentren.

¹⁶ En esta aplicación, el grado de accesibilidad indica si una unidad admite (1) o no (0) el tránsito de ganado. El valor de este atributo se deduce del tipo de cultivo de cada unidad. Todas las unidades cuyo cultivo es un recurso pastoral son accesibles. También existen otras unidades que aunque no tienen aprovechamiento forrajero son transitables, por ejemplo: las de uso “vías” o “improductivo”.

¹⁷ En esta aplicación, se considera la existencia de unidades que, siendo un recurso pastoral y teniendo un valor del atributo de medida superior a cero, no pueden ser aprovechadas por quedar inaccesibles al ganado.

¹⁸ Véase la sección 3.2 (“El diseño de zonas en sistemas extensivos de tipo cereal-ovino”).



b) Para cada unidad (x_j), representada por su centroide C_j , $\forall 1 \leq j \leq n$:

- Hallar p_i tal que $dw(c_j, p_i) \leq dw(c_j, p_s)$, $\forall 1 \leq s \leq m$
- Añadir C_j a z_i

c) Para cada región, z_i , $\forall 1 \leq i \leq m$, calcular:

- Su tamaño, $a(z_i)$, que se obtiene sumando los valores del atributo de medida de las unidades asignadas a dicha región: $a(z_i) = \sum_{x_j \in z_i} a_j$, donde a_j es el valor del atributo de medida de una unidad j que pertenece a z_i .
- Su error relativo: $e_i = \frac{a(z_i) - A(z_i)}{A(z_i)}$

d) Parámetro de control L .

- Calcular las variables correspondientes a cada z_i , $\forall 1 \leq i \leq m$:

$$- Sum_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_i - e_j)}{dsp(p_i, p_j)}$$

$$- Vaux_i = \left| \frac{D_{\min}}{Sum_i} \right|$$

- Calcular $L = \text{Mínimo}(Vaux_i)_{1 \leq i \leq m}$

e) Calcular el nuevo peso de cada región, z_i , $\forall 1 \leq i \leq m$:

$$• w_i^{actual} = w_i^{anterior} + L \times \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{(e_j - e_i)}{dsp(p_i, p_j)}$$

f) Asignar $I := I + 1$.

3. Si $I < T$ y $|e_i| > 0.1$ para alguna región z_i , $1 \leq i \leq m$, volver al paso 2.



4. Generar la solución final:

4.1. Cálculo del valor $a(z_i)$ definitivo, teniendo en cuenta la existencia de unidades inicialmente aprovechables¹⁹, pero que tienen una ubicación espacial que las hace inaccesibles e impide su aprovechamiento. Para identificar este tipo de unidades se utiliza el algoritmo de Dijkstra y el atributo de accesibilidad, calculando las distancias $dsp(,)$ de todas las unidades de una región a su correspondiente generador. En este caso, al recorrer el grafo de adyacencia, sólo se consideran las aristas que enlazan unidades adyacentes y accesibles. Con esta restricción resulta imposible encontrar un camino desde el vértice origen o generador hasta este tipo de unidades, por lo que no se puede calcular la distancia $dsp(,)$. Tras identificar estos elementos y actualizar sus atributos ‘aprovechamiento’ y ‘acceso’ con el valor “0”, se procede a revisar los valores $a(z_i)$ para adecuarlos al tamaño real de las regiones z_i . El ajuste consiste en sustraer los valores del atributo de medida de las unidades de este tipo existentes en cada región:

$$a(z_i)^{ajustada} = a(z_i) - \sum_{x_j \in z_i} a_j (1 - \text{aprovechamiento}_j),$$

donde a_j es el valor del atributo de medida de la unidad j (x_j), perteneciente a la región i y que no es aprovechable.

4.2. Cálculo del parámetro *porosidad global* de cada región. Este valor se obtiene a partir de la expresión:

$$\text{Porosidad}(z_i) = \frac{\text{Área_No_tránsito}(z_i)}{\text{Área_Tránsito}(z_i)} = \frac{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (1 - \text{acceso}_j)}{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (\text{acceso}_j)},$$

donde $\text{Área_Tránsito}(z_i)$ es la superficie total que ocupan en la región i (z_i) las unidades por las que se puede transitar, $\text{Área_No_tránsito}(z_i)$ es la superficie que ocupan las unidades no transitables en z_i , Área_j es la superficie de una unidad j (x_j).

4.3. Visualización del territorio o área de estudio, asignando a las unidades un color específico en función de la zona o región a la que pertenecen, y diferenciando con dos intensidades de color las unidades transitables de las que no lo son.

¹⁹ En la sección 3.2 (“El diseño de zonas en sistemas extensivos de tipo cereal-ovino”), se hace referencia a las unidades que siendo un recurso pastoral no pueden ser aprovechadas por quedar inaccesibles al ganado. Es necesario identificar este tipo de unidades para descontar su valor del tamaño de la región a la que pertenecen.

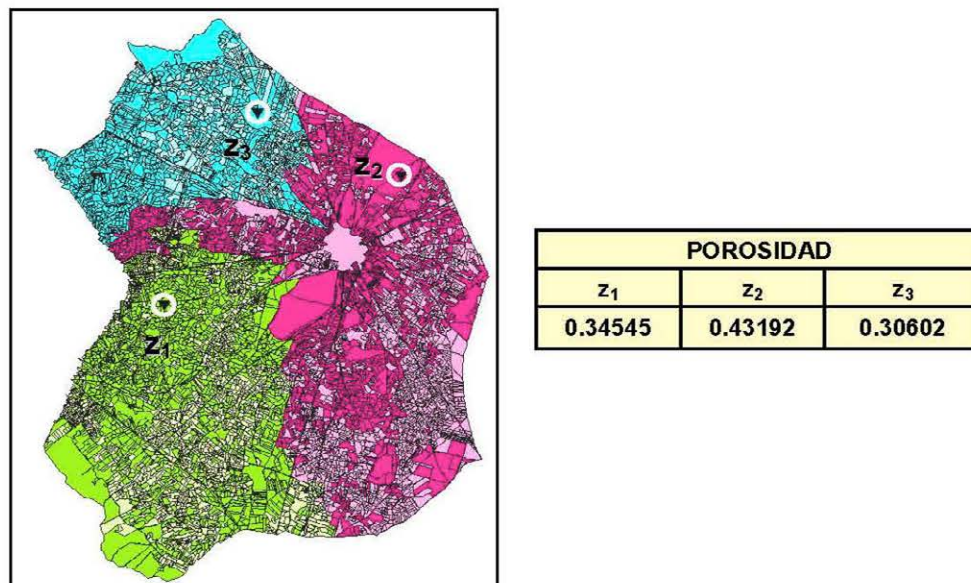


Figura 52. Visualización de las unidades asignadas a las zonas. Las unidades no accesibles se representan con un tono de color menos intenso. Tabla adjunta con los datos de porosidad de cada zona.

4.4. Generación de la geometría de las regiones obtenidas $\{z_1, z_2, \dots, z_m\}$. En este proceso se fusionan los recintos superficiales de las unidades asignadas a cada región, para generar la geometría correspondiente a su contorno.

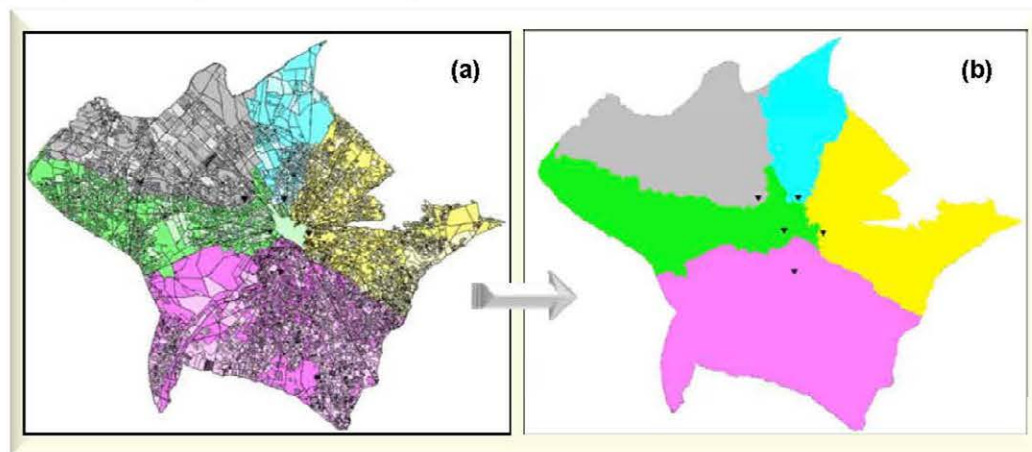


Figura 53. (a) Visualización de las unidades asignadas a las zonas. (b) Visualización de la geometría de las zonas.

El bucle del paso 2 termina cuando todas las regiones han alcanzado un tamaño, expresado en unidades del atributo de medida, de al menos el 90% del valor especificado por el usuario sin que ninguna exceda dicho valor en más de un 10%. Dado que podría no existir una solución para los datos de entrada, el bucle realiza un número máximo de iteraciones, hasta que el programa devuelve la mejor zonificación encontrada. Para generar la solución final es preciso que *las regiones obtenidas sean recintos conexos*. Tal y como se ha descrito en la sección 3.4, la propiedad de consistencia geodésica, correspondiente al uso de una métrica basada en el camino más corto, implica la generación de regiones conexas.

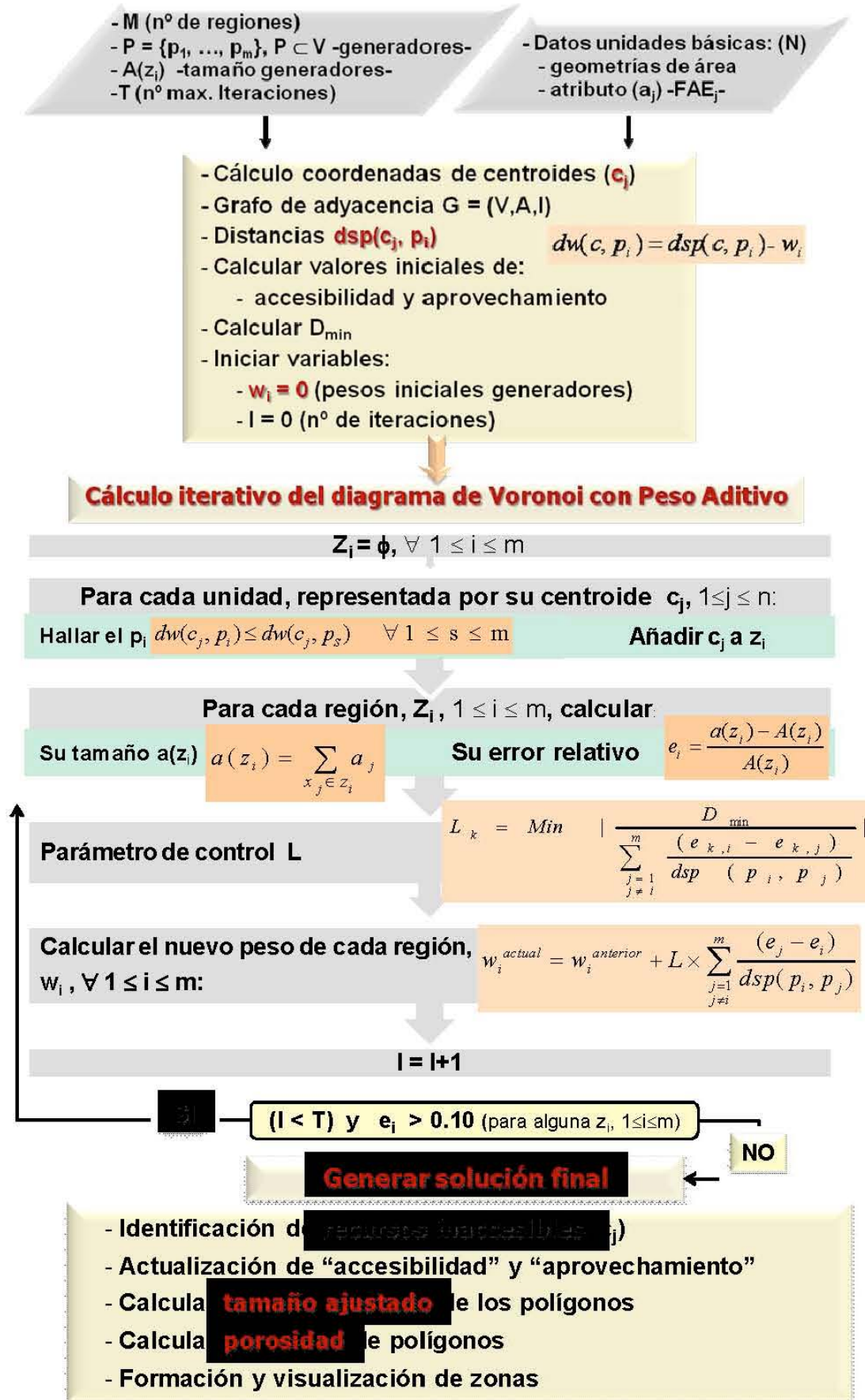


Figura 54. Fases del algoritmo correspondiente al modelo de solución.



3.4.4 Fortalezas y debilidades del modelo

3.4.4.1 Fortalezas

El modelo de solución propuesto no sólo es novedoso por el uso de los Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo en una aplicación de carácter geográfico, sino también por la capacidad de gestionar un elevado número de elementos superficiales en formato vectorial y presentar, con relativa rapidez, soluciones de partición espacial. En la tabla siguiente se muestra el tiempo invertido en realizar zonificaciones con un número diferente de regiones a partir de varios conjuntos de datos.

<i>Nº de unidades superficiales (n)</i>	<i>Nº de regiones (m)</i>	<i>Tiempo total (minutos)</i>
21037 parcelas	4	(1463 s) = 24.38 minutos
	5	(1734 s) = 28.90 minutos
	6	(2044 s) = 34.06 minutos
17539 parcelas	4	(1140 s) = 19 minutos
	5	(1314 s) = 21.9 minutos
	6	(1426 s) = 24.36 minutos
15496 parcelas	4	(863 s) = 14.38 minutos
	5	(1033 s) = 17.2 minutos
	6	(1141 s) = 19.01 minutos

Tabla 11. Tiempo total de ejecución de la aplicación en diferentes problemas de partición espacial.

Para analizar con más detalle la eficiencia del algoritmo implementado, se ha realizado un experimento con el objetivo de medir el tiempo de ejecución del proceso de partición espacial, considerando diferentes situaciones y conjuntos de datos.

Las pruebas de rendimiento de la aplicación se han llevado a cabo en un equipo con procesador AMD Athlon 64 3400, 2.4 GHz y 1 GB de memoria RAM.

En estas pruebas sólo se ha considerado el tiempo correspondiente a la ejecución de los algoritmos más relevantes del programa: Dijkstra y diagramas de Voronoi con peso aditivo adaptativo. Los resultados obtenidos están condicionados fundamentalmente por los siguientes parámetros:

- (a) Número total de unidades que constituyen el territorio (n).
- (b) Número de regiones a obtener (m).
- (c) Ubicación de los generadores de las regiones (X_{p_i}, Y_{p_i}) .
- (d) Dimensión o tamaño de cada región $(A(z_i))$.



En cada conjunto de pruebas, sólo se han considerado como variables de análisis los parámetros a (número de unidades básicas) y b (número de regiones). A continuación se muestran los datos obtenidos en función de la variable analizada.

- Variable de análisis: número de unidades

En este test se han utilizado conjuntos de datos de varios tamaños (número de unidades) en diversos procesos de partición. En cada zonificación se ha establecido un número diferente de regiones.

En las pruebas realizadas se han calculado los tiempos de ejecución de los principales algoritmos que intervienen en el método de partición espacial. Los siguientes ejemplos indican que la mayor carga de proceso corresponde a la aplicación del algoritmo de Dijkstra frente al diagrama de Voronoi, si bien, en ambos casos, los tiempos de ejecución aumentan con el número de unidades y el de semillas o generadores de regiones.

En el algoritmo de Dijkstra, el tiempo de ejecución parece crecer con el número de unidades según una función cuadrática, cuyo ajuste, teniendo en cuenta los valores del coeficiente de determinación R^2 , es mejor en las particiones de mayor número de regiones ($R^2=0.9999$ para 6 regiones, frente a $R^2=0.9962$ para 4 regiones).

El tiempo empleado en la obtención de los diagramas de Voronoi con peso aditivo adaptativo, mucho menor que el invertido en Dijkstra, parece crecer con el número de unidades según una función polinómica de orden 2 que, dado el valor de sus coeficientes, puede considerarse una función cuadrática.



Nº de regiones (m)	Nº de unidades (n)	Nº de iteraciones	Tiempo de ejecución (segundos)	
			Algoritmo de Dijkstra	Diagrama de Voronoi (DVPAA)
3	1925	43	3	1
	4471	126	15	1,8
	8021	72	55	2
	10000	59	108	3
	11999	29	128	3
	15496	90	275	5
	17539	59	308	11
	21037	1	392	19
4	1925	83	4	1
	4471	251	19	2
	8021	197	76	2
	10000	423	143	4
	11999	99	177	4
	15496	398	279	7
	17539	1242	383	19
	21037	1017	525	28
5	1925	119	5	2
	4471	205	24	2
	8021	304	92	3
	10000	624	163	5
	11999	199	217	5
	15496	488	356	9
	17539	875	502	16
	21037	1693	644	34
6	1925	221	5	2
	4471	51	31	3
	8021	399	108	4
	10000	1269	169	7
	15496	819	424	12
	17539	1520	543	23
	21037	1984	804	41

Tabla 12. Tiempos de ejecución de los algoritmos principales de la aplicación, considerando conjuntos de datos de diferente número de unidades.

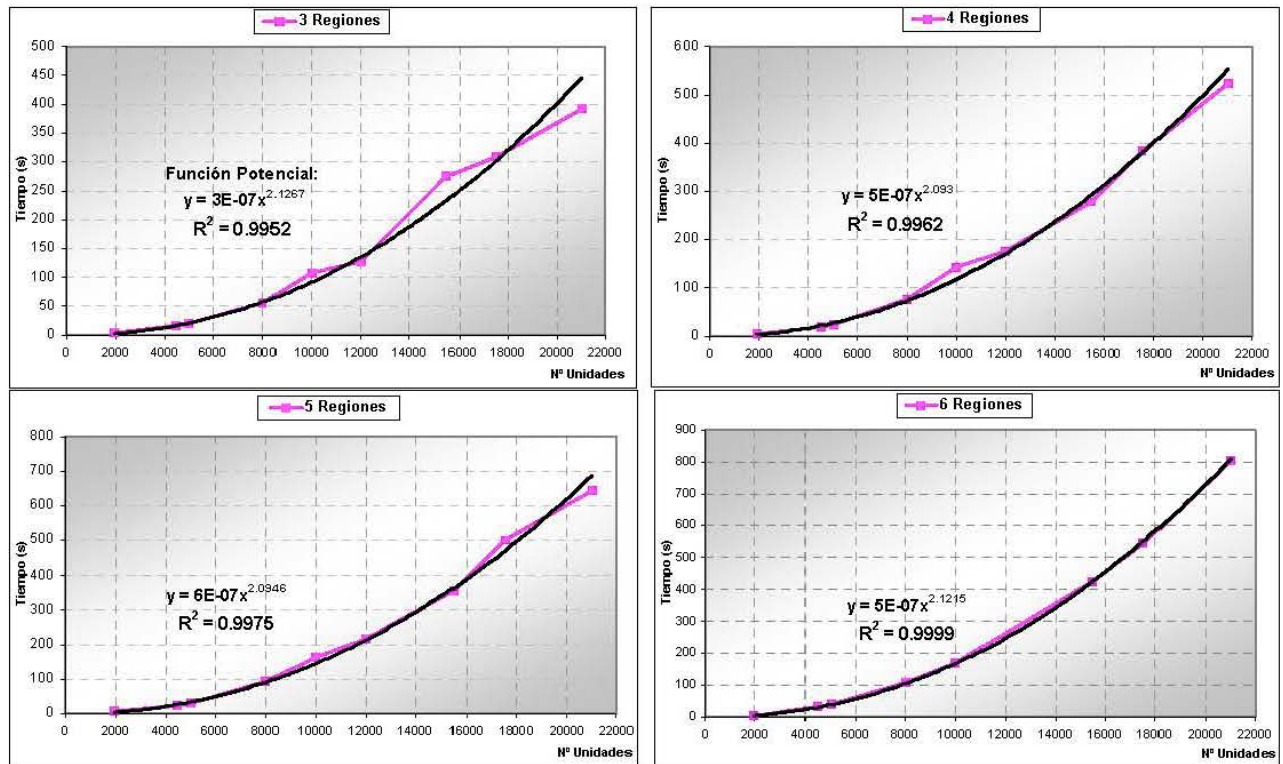


Figura 55. Tiempos de ejecución del algoritmo Dijkstra en particiones de un número predeterminado de regiones, considerando conjuntos de datos de varios tamaños. Junto a la representación de los datos aparecen una función de ajuste potencial -color negro- y su respectivo coeficiente de determinación R^2 .

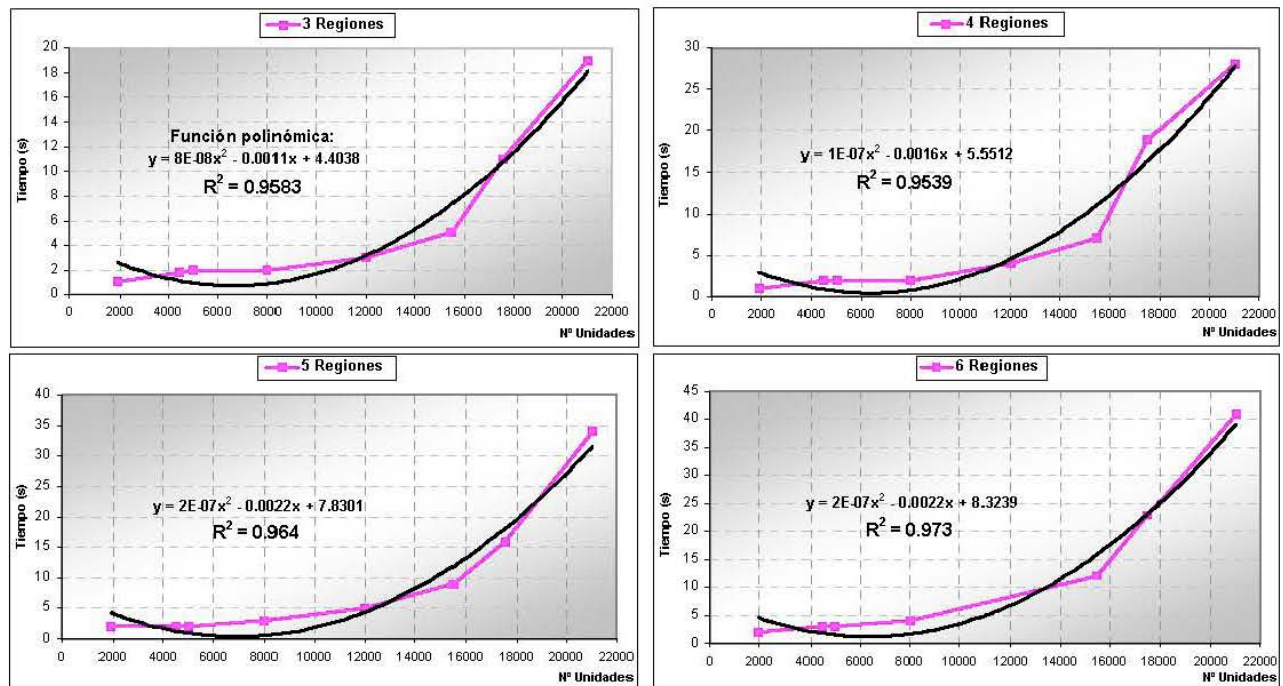


Figura 56. Tiempos de ejecución del algoritmo Voronoi en particiones de un número predeterminado de regiones, considerando conjuntos de datos de varios tamaños. Junto a la representación de los datos aparecen una función de ajuste potencial -color negro- y su respectivo coeficiente de determinación R^2 .



A continuación se muestra una tabla que incluye los gráficos correspondientes a las particiones espaciales obtenidas en cada una de las pruebas realizadas. Tal y como puede observarse, la ubicación de los generadores presenta una distribución similar en todas las pruebas.

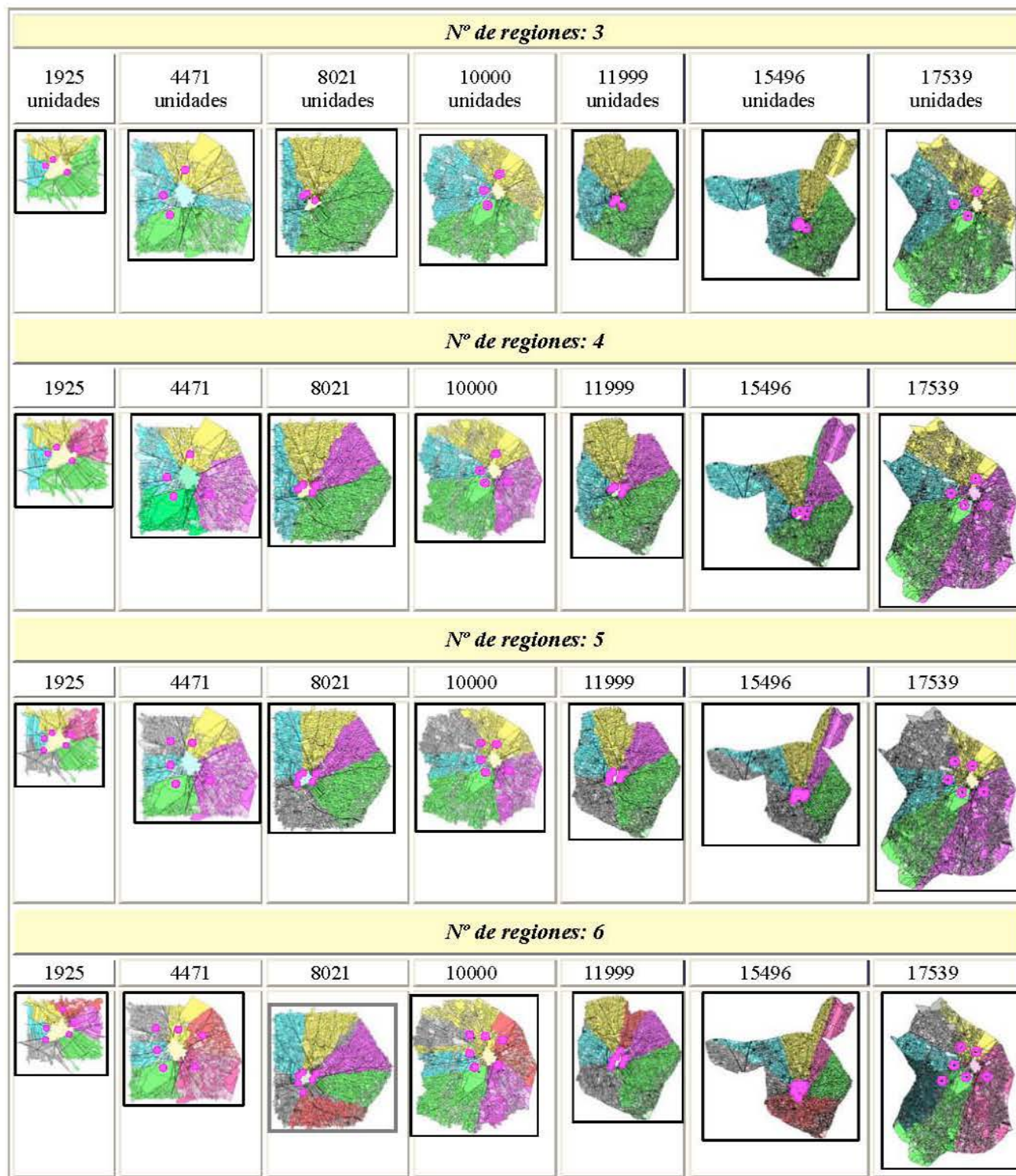


Figura 57. Particiones espaciales de diferente número de regiones, considerando conjuntos de datos de varios tamaños.



- Variable de análisis: número de regiones

Los tiempos invertidos en la ejecución del algoritmo de Dijkstra y del diagrama de Voronoi con peso aditivo adaptativo son proporcionales al número de generadores que intervienen en el proceso de reparto espacial. En ambos algoritmos, el tiempo de ejecución crece con el número de regiones según una función lineal. Tanto en Dijkstra como en el diagrama de Voronoi, el tiempo de ejecución para un mismo conjunto de datos suele duplicarse al hacerlo el número de regiones generadas:

- (8021 unidades). Dijkstra: 55 segundos para 3 regiones y 108 segundos para 6. Voronoi: 2 segundos para 3 regiones y 4 segundos para 6 regiones.
- (21037 unidades). Dijkstra: 392 segundos para 3 regiones y 804 para 6. Voronoi: 19 segundos para 3 regiones y 41 para 6 regiones.

Para comprobar este hecho se ha ajustado la función a un polinomio de grado 2, donde se observa que el coeficiente de x^2 es sensiblemente inferior al de x , lo que indica que el término dominante es lineal.

Nº unidades (n)	Nº de regiones (m)	Tiempo de ejecución (segundos)	
		Algoritmo de Dijkstra	Diagrama de Voronoi (DVPAA)
1925	3	3	1
	4	4	1
	5	5	2
	6	5	2
4471	3	15	1
	4	19	1
	5	24	2
	6	31	2
8021	3	55	2
	4	76	2
	5	92	3
	6	108	4
11999	3	128	3
	4	177	4
	5	217	5
15496	3	275	5
	4	279	7
	5	356	9
	6	424	12
17539	3	308	11
	4	383	19
	5	502	16
	6	543	23
21037	3	392	19
	4	525	28
	5	644	34

Tabla 13. Tiempos de ejecución de los algoritmos principales de la aplicación, generando particiones espaciales de diferente número de regiones.

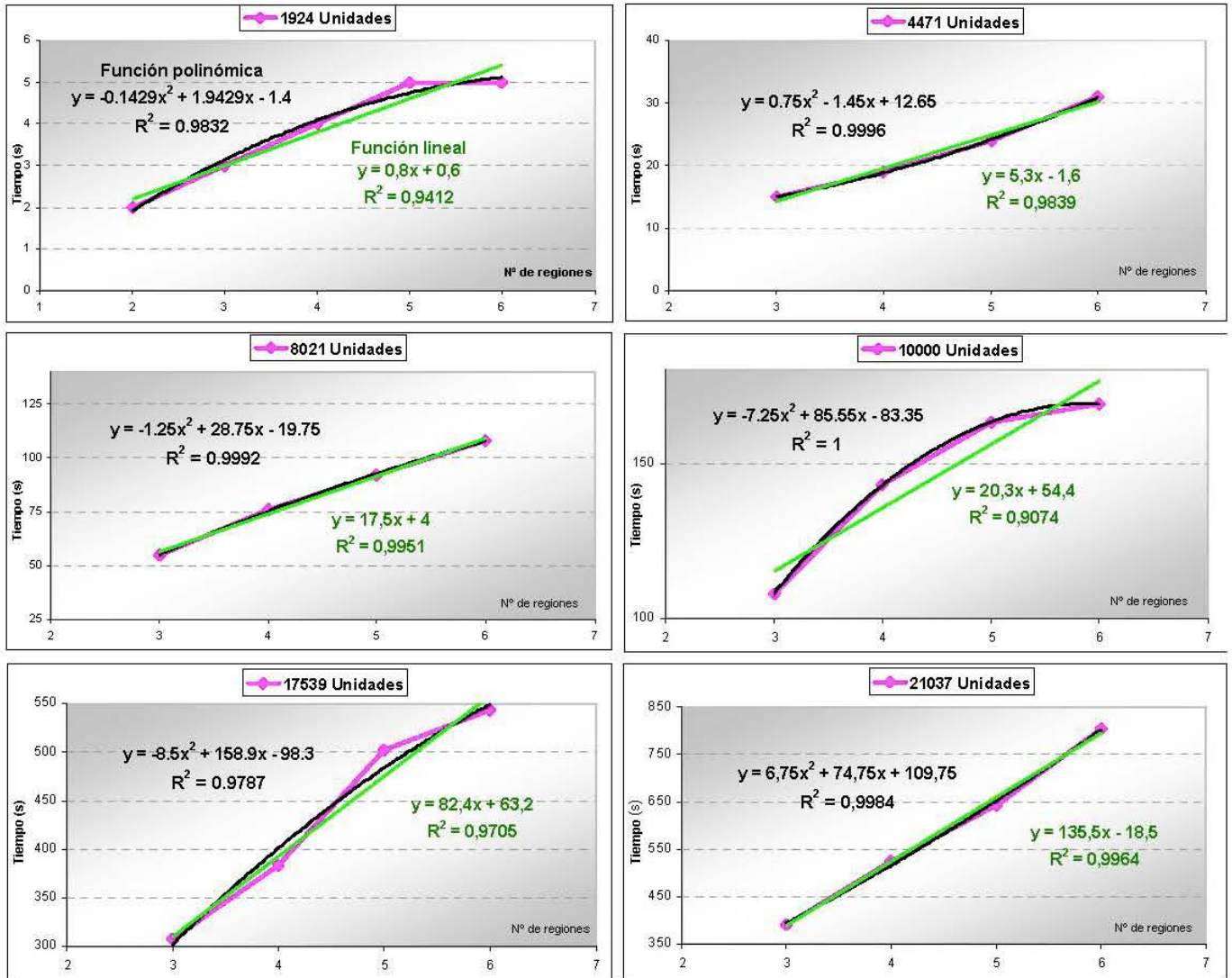


Figura 58. Tiempos de ejecución del algoritmo Dijkstra, considerando conjuntos de datos de varios tamaños en particiones de diferente número de regiones. Junto a la representación de los datos aparecen: dos funciones de ajuste (polinómica de orden 2 -color negro- y lineal -color verde-) y sus respectivos coeficientes de determinación R^2 .

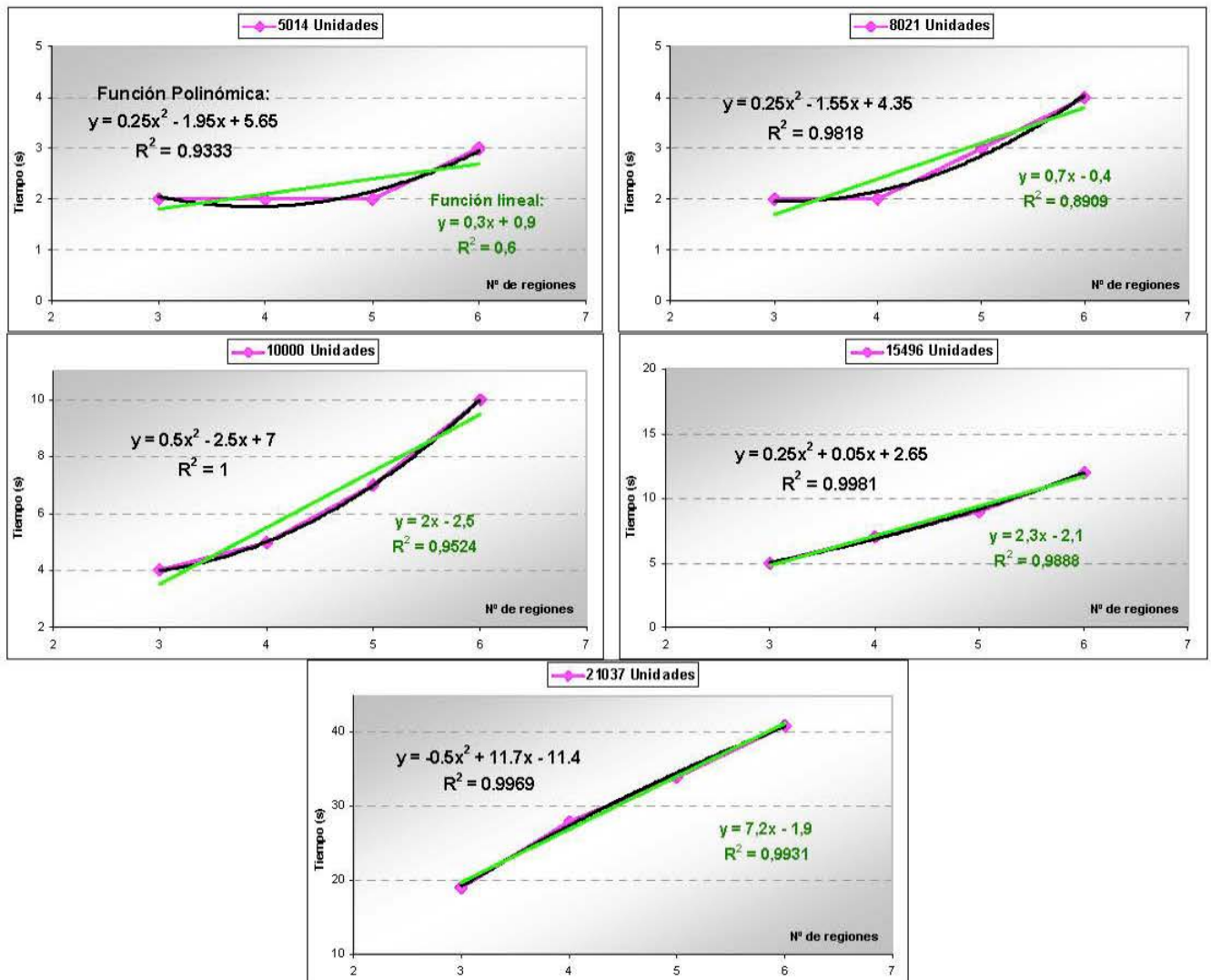


Figura 59. Tiempos de ejecución del diagrama de Voronoi (DVPAA), considerando conjuntos de datos de varios tamaños en particiones de diferente número de regiones. Junto a la representación de los datos aparecen: dos funciones de ajuste (polinómica de orden 2 -color negro- y lineal -color verde-) y sus respectivos coeficientes de determinación R^2 .



Cuando la configuración geométrica y el tamaño predeterminado de los generadores no imposibilita la solución, *el parámetro L adaptativo* incluido en el modelo, frente a cualquier constante numérica predefinida, *permite encontrar en un mayor número de casos una zonificación ajustada a estos criterios*. Además, este parámetro *evita la inestabilidad del proceso de cálculo* cuando existe una solución que verifica las condiciones de partida. En el ejemplo siguiente se muestran las soluciones obtenidas en el mismo problema con un L adaptativo y con un valor constante de 60000 y 80000. En estos dos últimos casos, L genera una rápida variación inicial en los pesos que produce una variación similar en los errores relativos de las zonas, por lo que el proceso se hace inestable y no se obtiene una solución válida.

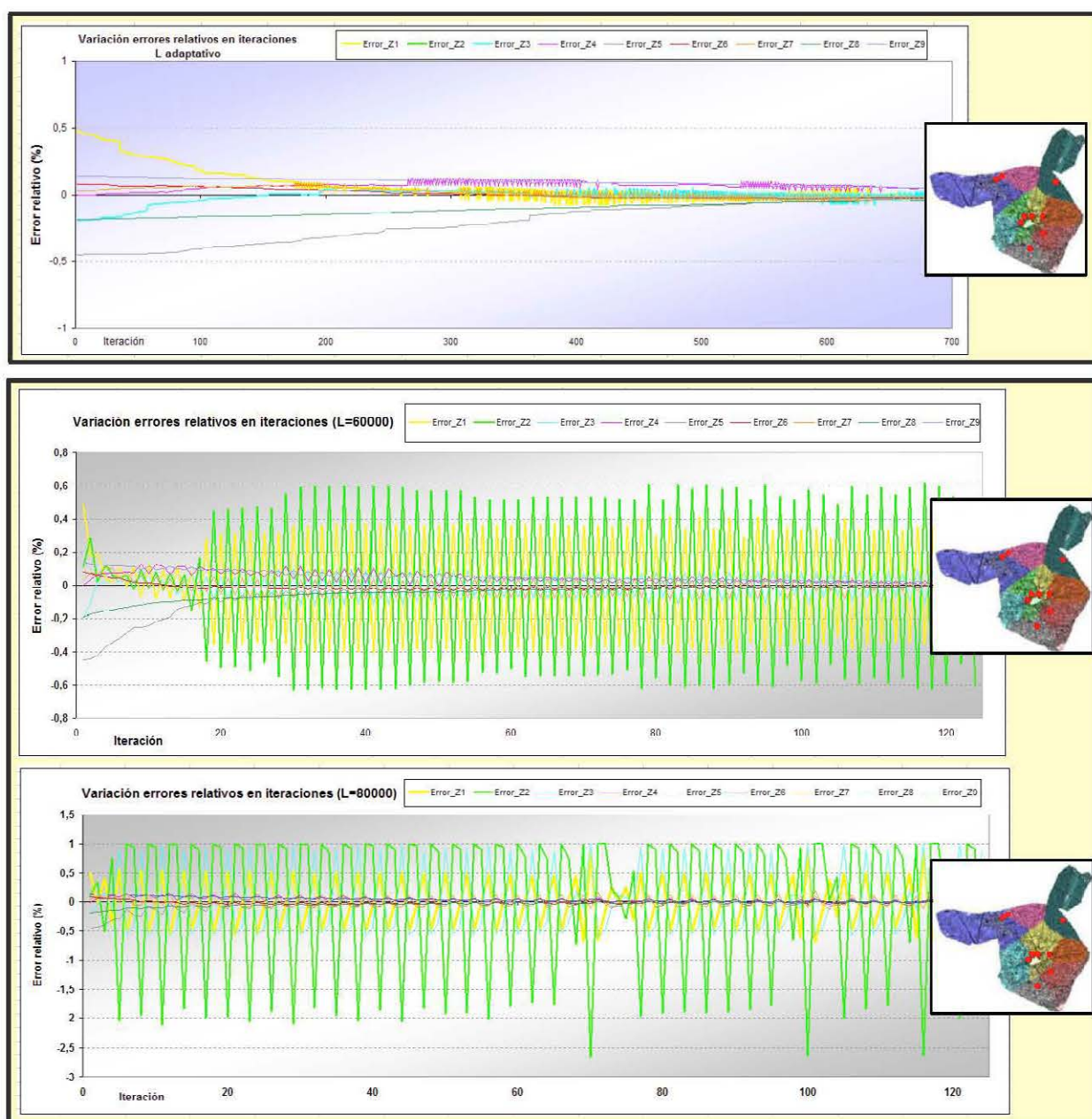


Figura 60. Variación de los errores relativos de las regiones durante el proceso de cálculo para diferentes L .



En este otro ejemplo se muestran las soluciones obtenidas en una zonificación de 560 unidades y 4 regiones, usando: (a) un L adaptativo y (b) un L de valor constante $-L=80000$ -. En el primer caso, el proceso de cálculo finaliza en la iteración nº 133, generando una solución ajustada a las condiciones de partida. En el otro caso, el uso de un L constante genera una rápida variación inicial en los pesos y en los errores relativos de las zonas, por lo que el proceso se hace inestable y no se obtiene una solución válida.

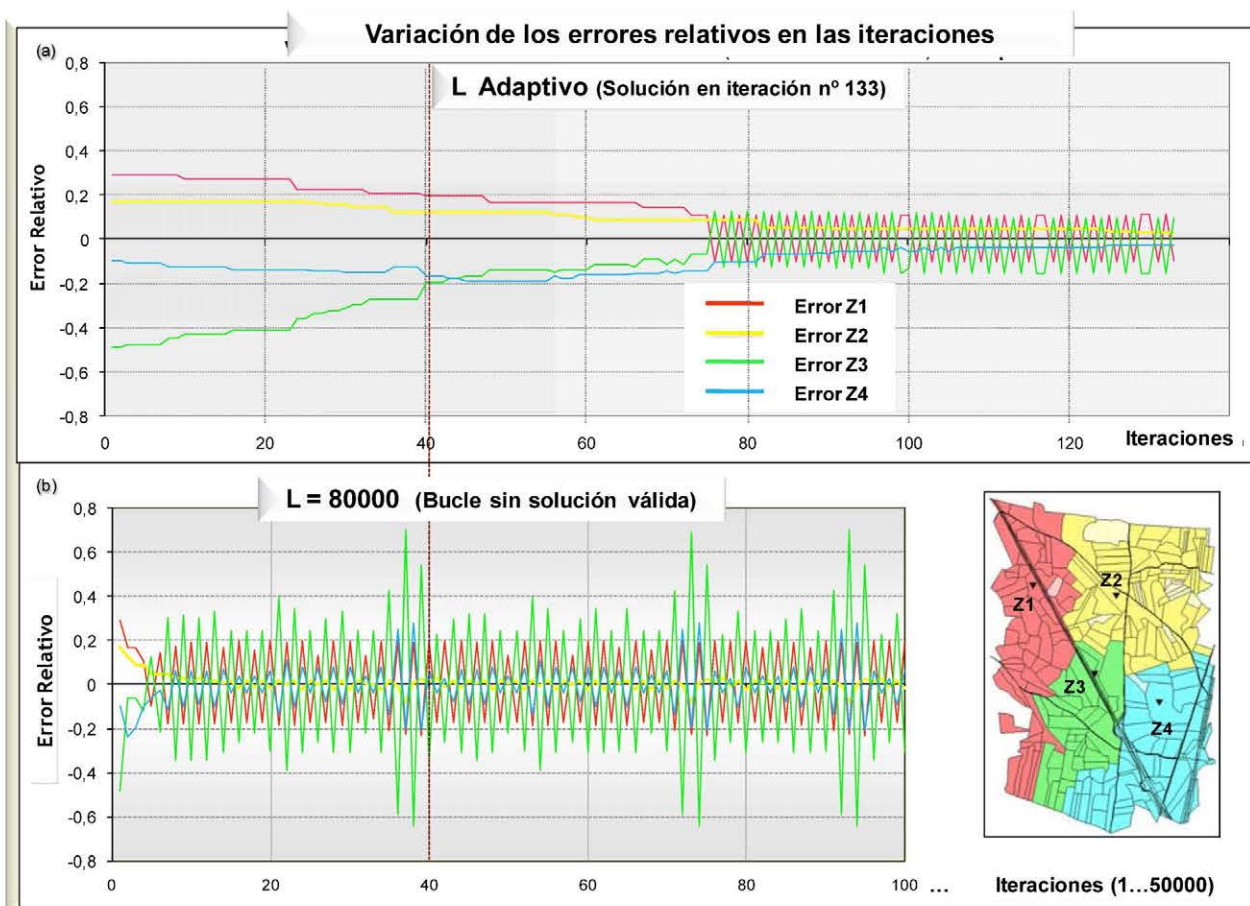


Figura 61. Variación de los errores relativos de las zonas en el proceso de cálculo, usando: (a) L adaptativo, (b) $L=80000$.



3.4.4.2 Debilidades

El diagrama de Voronoi de un conjunto de generadores puntuales depende fundamentalmente de la configuración espacial relativa, entre sí y respecto a las unidades del territorio.

En relación con lo anterior, *el algoritmo que se ha diseñado no encuentra siempre una solución al problema de partición espacial*. Existen una serie de casos, donde la configuración espacial relativa de los generadores impide que se obtenga una zonificación que verifique las condiciones de tamaño y tolerancia de cada región.

En la mayoría de los problemas de diseño de zonas, la elección de los generadores no está prefijada y se calcula en una fase previa de localización. La configuración espacial de estos elementos, obtenida mediante técnicas diversas²⁰, tiene un considerable impacto en la zonificación resultante, de forma que una selección “inadecuada” difícilmente puede generar regiones válidas que verifiquen los criterios establecidos (Kalcsics et al. 2005). De hecho, una de las mayores dificultades, a las que tienen que hacer frente los modelos de solución en problemas de diseño de zonas, es la localización inicial de los centros o generadores, como paso previo al algoritmo de formación de regiones (Ricca et al. 2008).

En la tabla siguiente se incluyen ejemplos de configuraciones en las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria. Los datos de cada partición espacial se han obtenido una vez que el programa ha realizado el número máximo de iteraciones especificado ($T = 50000$). Obsérvense los valores de error relativo, expresado en porcentaje²¹, de las diferentes regiones.

Nº unidades	Nº regiones	Regiones		Resultado
15496	5	z_1	A(z_1): 900 a(z_1): 1115.93	
			e_1 : 26.86%	
		z_2	A(z_2): 1100 a(z_2): 1103.91	
			e_2 : 0.22%	
		z_3	A(z_3): 1500 a(z_3): 877.46	
			e_3 : -41.57%	
		z_4	A(z_4): 700 a(z_4): 1103.17	
			e_4 : 54.26%	
		z_5	A(z_5): 1012 a(z_5): 1012.31	
			e_5 : 0.03%	

Figura 62. Zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria (I).

²⁰ Ejemplos de modelos empleados: P-mediana, P-centro, Minimax, SPLP (Simple Plant Location Problem), etc.

²¹
$$e_i(\%) = \frac{a(z_i) - A(z_i)}{A(z_i)} \times 100$$



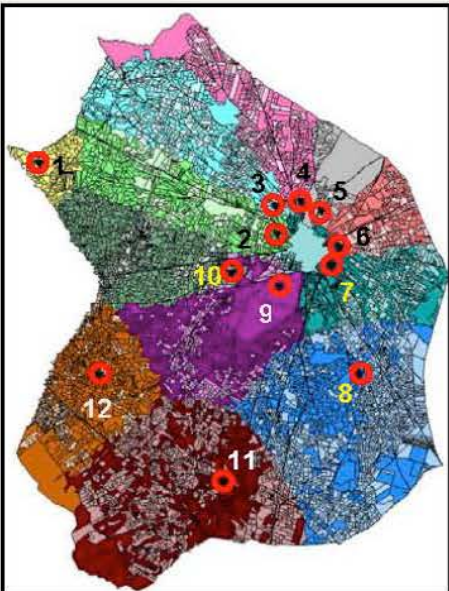
Nº de unidades	Nº de regiones	Regiones		Resultado
17539	12	z ₁	A(z ₁): 200	a(z ₁): 201.52
			e ₁ : 0.76%	
		z ₂	A(z ₂): 650	a(z ₂): 650.06
			e ₂ : 0.01%	
		z ₃	A(z ₃): 780	a(z ₃): 910.74
			e ₃ : 16.76%	
		z ₄	A(z ₄): 630	a(z ₄): 495.03
			e ₄ : -21.42%	
		z ₅	A(z ₅): 450	a(z ₅): 444.49
			e ₅ : -1.22%	
		z ₆	A(z ₆): 300	a(z ₆): 300.32
			e ₆ : 0.11%	
		z ₇	A(z ₇): 450	a(z ₇): 444.13
			e ₇ : -1.30%	
		z ₈	A(z ₈): 920	a(z ₈): 897.47
			e ₈ : -2.45%	
		z ₉	A(z ₉): 810	a(z ₉): 799.46
			e ₉ : -1.30%	
		z ₁₀	A(z ₁₀): 685	a(z ₁₀): 680.90
			e ₁₀ : -0.60%	
		z ₁₁	A(z ₁₁): 1010	a(z ₁₁): 989.92
			e ₁₁ : -1.99%	
		z ₁₂	A(z ₁₂): 825	a(z ₁₂): 824.04
			e ₁₂ : -0.12%	
				

Figura 63. Zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria (II).



Nº unidades	Nº regiones	Regiones		Resultado
8021	6	z ₁	A(z ₁): 480 a(z ₁): 778.71	
			<i>e₁: 62.23%</i>	
		z ₂	A(z ₂): 550 a(z ₂): 551.90	
			<i>e₂: 0.35%</i>	
		z ₃	A(z ₃): 360 a(z ₃): 312.43	
			<i>e₃: -13.21%</i>	
		z ₄	A(z ₄): 420 a(z ₄): 407.52	
			<i>e₄: -2.97%</i>	
		z ₅	A(z ₅): 400 a(z ₅): 397.73	
			<i>e₅: -0.57%</i>	
		z ₆	A(z ₆): 245 a(z ₆): 7.401	
			<i>e₆: -96.98%</i>	

Figura 64. Zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria (III).

Cuando el algoritmo diseñado no encuentra una solución ajustada a las especificaciones de partida (todas las regiones han de tener un tamaño $a(z_i)$ que verifique $0.9A(z_i) \leq a(z_i) \leq 1.1A(z_i)$), es posible encontrar la partición espacial de menor error del bucle.

En estos casos, si se calcula el Error Medio de los valores absolutos de los errores relativos

$$E_{\text{medio}} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{|a(z_i) - A(z_i)|}{A(z_i)}}{m},$$

la iteración en la que dicha medida toma el valor mínimo, corresponde a la mejor de las zonificaciones generadas en el bucle hasta llegar al número máximo de iteraciones ($T = 50000$).

En la tabla siguiente se presentan dos ejemplos de particiones donde el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria. En ambos casos, se muestra la solución obtenida al finalizar el bucle, y las zonificaciones correspondientes a las iteraciones donde los respectivos E_{medio} y $E_{\text{máximo}}$ ²² son mínimos. Obsérvense los valores de error relativo de todas las regiones en cada una de estas zonificaciones.

$$^{22} E_{\text{max}} = \max \left\{ \frac{|a(z_i) - A(z_i)|}{A(z_i)}, \quad 1 \leq i \leq m \right\}$$



Nº de unidades	Iteraciones realizadas	Error	Regiones		Resultado
15496	50000	Error_{medio}: 0.24708413 Error_{máximo}: 0.57595285	Z ₁	<i>e₁: 26.86%</i>	
			Z ₂	<i>e₂: 0.22%</i>	
			Z ₃	<i>e₃: -41.57%</i>	
			Z ₄	<i>e₄: 54.26%</i>	
			Z ₅	<i>e₅: 0.03%</i>	
	4349	Error_{medio}: 0.10236537	Z ₁	<i>e₁: 24.1%</i>	
			Z ₂	<i>e₂: 0.35%</i>	
			Z ₃	<i>e₃: -4.19%</i>	
			Z ₄	<i>e₄: -22.50%</i>	
			Z ₅	<i>e₅: 0.03%</i>	
	1133	Error_{máximo}: 0.22500857	Z ₁	<i>e₁: 5.04%</i>	
			Z ₂	<i>e₂: -2.11%</i>	
			Z ₃	<i>e₃: -6.16%</i>	
			Z ₄	<i>e₄: -22.50%</i>	
			Z ₅	<i>e₅: 22.27%</i>	

Figura 65. Ejemplo (1) de soluciones de menor error en zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria.



Nº de unidades	Iteraciones realizadas	Error	Regiones		Resultado
8021	50000	Error_{medio}: 0.29384894 Error_{máximo}: 0.96979183	Z ₁	e_1: 62.23%	
			Z ₂	e_2: 0.35%	
			Z ₃	e_3: -13.21%	
			Z ₄	e_4: -2.97%	
			Z ₅	e_5: -0.57%	
			Z ₆	e_6: -96.98%	
	1587	Error_{medio}: 0.11411424	Z ₁	e_1: -9.20%	
			Z ₂	e_2: 0.35%	
			Z ₃	e_3: -12.89%	
			Z ₄	e_4: -2.97%	
			Z ₅	e_5: -0.57%	
			Z ₆	e_6: 42.49%	
	292	Error_{máximo}: 0.37204898	Z ₁	e_1: -27.33%	
			Z ₂	e_2: 15.94%	
			Z ₃	e_3: -31.93%	
			Z ₄	e_4: 32.97%	
			Z ₅	e_5: -17.62%	
			Z ₆	e_6: 37.20%	

Figura 66. Ejemplo (2) de soluciones de menor error en zonificaciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria.



De lo expuesto anteriormente se deduce que el uso de un conjunto prefijado de generadores, por un lado, facilita y reduce la complejidad del modelo de solución, y por otro, plantea configuraciones geométricas en las se pone de manifiesto las deficiencias del algoritmo diseñado. Evidentemente el modelo que se presenta no tiene carácter “universal” y está limitado, entre otros factores, por la compleja naturaleza de las relaciones espaciales.

3.4.5 Otros modelos de solución

Es importante destacar que el DVPA no es el único método de solución al tipo de problemas que aborda esta tesis. En la fase inicial de diseño del algoritmo, se realizaron diversas pruebas con otros tipos de diagramas de Voronoi, que fueron abandonados por falta de tiempo, ya que cada uno de ellos requería una determinación específica de sus parámetros cuyo estudio planteaba nuevas líneas de investigación.

A continuación se presentan los algoritmos diseñados, describiendo únicamente las fases más significativas de cada uno de ellos. En todos los casos se realiza un proceso iterativo de cálculo, usando el mismo conjunto de datos de entrada:

- Un grafo de adyacencia $G = (V, A, l)$ de todas las unidades básicas del territorio.
- El número m de regiones a formar.
- El subconjunto $P \subset V$ de las m semillas (p_i). De cada semilla o generador se conoce el tamaño $A(z_i)$ de la región a la que dará lugar.
- De cada unidad se dispone de:
 - » Sus datos espaciales (geometría de área).
 - » Las coordenadas cartesianas de su centroide c_j .
 - » El valor de su atributo de medida (a_j).
 - » Su grado de accesibilidad. Este atributo es de carácter booleano y puede tomar el valor 0 (no accesible) y 1 (accesible).
 - » Su nivel de aprovechamiento, es decir, si con independencia del valor de su atributo de medida contribuye o no al tamaño de la región. Este atributo es de carácter booleano y puede tomar el valor 0 (no aprovechable) y 1 (aprovechable). El programa asigna inicialmente los valores de aprovechamiento en función del atributo de medida de cada unidad:
$$a_j > 0 \Rightarrow \text{aprovechamiento} = 1, \quad a_j = 0 \Rightarrow \text{aprovechamiento} = 0$$
- Las distancias $dsp(c_j, p_i)$ entre un centroide (c_j) y un generador (p_i) cualquiera.
- El número máximo de iteraciones del algoritmo, T .



En todos los modelos se usa una métrica dw que se calcula a partir de la distancia del camino más corto dsp : $dw(c_j, p_i) = dsp(c_j, p_i) - w_i$, donde c_j es el centroide de la unidad j , p_i es el generador i y w_i es el peso de dicho generador.

- Modelo 1

Las etapas de este algoritmo son las siguientes:

1. Iniciar las variables:

- a) Asignar un valor al umbral de tolerancia ε para el error máximo de la solución.
- b) Asignar los valores que tomarán los pesos de los generadores en la primera iteración del bucle de cálculo: $w_i^0 := \sqrt{\frac{A(z_i)}{A_{medio}}}$ o $w_i^0 := \sqrt{A(z_i) \times A_{medio}}$, $\forall 1 \leq i \leq m$,

siendo $A_{medio} = \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{Sup_{territorio}}$ donde a_j es el valor del atributo de medida de la unidad j , $Sup_{territorio}$ es la superficie del territorio y n es el número de unidades básicas existentes en dicho territorio. El valor de a_j , $a_j = CF_j \times Sup_j$, es el resultado de multiplicar un coeficiente, correspondiente al tipo de cultivo existente en la unidad j , por la superficie de la unidad j .

La fórmula elegida para el cálculo inicial de los pesos depende del valor de A_{medio} :

$$\text{- Si } A_{medio} < 1, w_i^0 := \sqrt{A(z_i) \times A_{medio}}$$

$$\text{- Si } A_{medio} \geq 1, w_i^0 := \sqrt{\frac{A(z_i)}{A_{medio}}}$$

- c) El número de iteraciones realizadas: $I := 0$.

2. Núcleo del algoritmo. En cada iteración:

- a) Asignar $z_i := \emptyset$, $\forall 1 \leq i \leq m$
- b) Para cada unidad (x_j), representada por su centroide c_j , $1 \leq j \leq n$:
 - Hallar p_i tal que $dw(c_j, p_i) \leq dw(c_j, p_s)$, $\forall 1 \leq s \leq m$
 - Añadir c_j a z_i



c) Para cada región, z_i , $1 \leq i \leq m$, calcular:

- Su tamaño, $a(z_i)$, que se obtiene sumando los valores del atributo de medida de las unidades asignadas a dicha región: $a(z_i) = \sum_{x_j \in z_i} a_j$, donde a_j es el valor del atributo de medida de una unidad j que pertenece a z_i .
- Su coeficiente de error: $e_i = \frac{A(z_i)}{a(z_i)}$, donde $A(z_i)$ es el tamaño prefijado para la región i y $a(z_i)$ es el tamaño calculado para dicha región.

d) Calcular el nuevo peso de cada región, z_i , $\forall 1 \leq i \leq m$:

$$w_i^{actual} = w_i^{anterior} \times e_i^K, \text{ donde } e_i \text{ es el coeficiente de error de la región } z_i \text{ y}$$

K es un parámetro que se calcula a partir de la expresión $K = \frac{1}{2 \times C}$.

El valor de C se obtiene empíricamente a partir del parámetro λ , definiendo una tabla con las asociaciones de valores entre ambos parámetros:

- $\lambda = \max_{1 \leq i \leq m} \{e_i, e_i^{-1}\}$, es decir, λ es el valor máximo de los coeficientes de error de todas las regiones, de forma que $\lambda \geq 1$, siendo 1 el valor óptimo.

- Si $\lambda \leq 1.5 \rightarrow C = 1 \rightarrow K = \frac{1}{2}$;

- Si $1.5 < \lambda \leq 2 \rightarrow C = 2 \rightarrow K = \frac{1}{4}$;

- Si $2 < \lambda \leq 3 \rightarrow C = 2.5 \rightarrow K = \frac{1}{5}$;

- ...

e) Calcular el error de la solución: $E = (\max_{1 \leq i \leq m} \{e_i, e_i^{-1}\}) - 1 = \lambda - 1$

f) Asignar $I := I + 1$.

3. Si $I < T$ y $E > \varepsilon$, volver al paso 2.



De este algoritmo se hizo una *versión simplificada*, introduciendo las modificaciones siguientes:

1. Iniciar las variables:

- a) En primer lugar se calculan unos valores aproximados para los pesos de los generadores, usando las expresiones:

$$w_i^{aux} := \sqrt{\frac{A(z_i)}{A_{medio}}} \quad \text{ó} \quad w_i^{aux} := \sqrt{A(z_i) \times A_{medio}}, \forall 1 \leq i \leq m,$$

- b) Una vez obtenidos estos valores, se calculan los pesos que se utilizarán en la primera iteración del bucle:

$$w_i^0 = \frac{\sum_{j=0}^m (w_i^{aux} - w_j^{aux}) \times \sqrt{dsp(p_i, p_j)}}{\sqrt{\sum_{j=0}^m dsp(p_i, p_j)}}$$

2. Núcleo del algoritmo. En cada iteración:

- a) Asignar $z_i := \emptyset$, $\forall 1 \leq i \leq m$
- b) Para cada unidad (x_j), representada por su centroide c_j , $1 \leq j \leq n$:
- Hallar p_i tal que $dw(c_j, p_i) \leq dw(c_j, p_s)$, $\forall 1 \leq s \leq m$
 - Añadir c_j a z_i
- c) Para cada región, z_i , $\forall 1 \leq i \leq m$, calcular:
- Su tamaño $a(z_i)$, $a(z_i) = \sum_{x_j \in z_i} a_j$, donde a_j es el valor del atributo de medida de una unidad j que pertenece a z_i .
 - Su coeficiente de error: $e_i = \frac{A(z_i)}{a(z_i)}$.

El error de la solución se calcula a partir de estos coeficientes, de modo que:

- Si $e_i < \frac{1}{e_i}$ y $\frac{1}{e_i} > E$ entonces $E = \frac{1}{e_i}$
- Si $e_i > \frac{1}{e_i}$ y $e_i > E$ entonces $E = e_i$



- d) Calcular el nuevo peso de cada región, z_i , $\forall 1 \leq i \leq m$. Se han realizado pruebas con dos expresiones diferentes:
- $w_i^{actual} = w_i^{anterior} \times e_i^{1/2}$
 - $w_i^{actual} = w_i^{anterior} + e_i^{1/2}$. En esta versión se incrementa el número de iteraciones que realiza el bucle antes de que se verifique alguna de las condiciones de parada.
- e) Considerar como error de la solución el último valor obtenido para E al salir del bucle correspondiente a la fase c.
- f) Asignar $I := I + 1$.
3. Si $I < T$ y $E > \epsilon$, volver al paso 2.

- Modelo 2

Las etapas de este algoritmo son las siguientes:

1. Iniciar las variables:

- a) Asignar un valor al coeficiente C, tal que $0 < C < 1$. Este factor permitirá controlar los pesos de manera que: $w_i - w_j \leq C \times dw(p_i, p_j), \forall 1 \leq i, j \leq m$.
- b) Asignar un valor al umbral de tolerancia ϵ para el error máximo de la solución.
- c) Asignar unos valores aproximados a los pesos de los generadores:
 $w_i^{aux} := A(z_i), \forall 1 \leq i \leq m$.
- d) Asignar los valores w_i^0 que tomarán los pesos de los generadores en la primera iteración del bucle:
 - d.1. Para cada región, z_i , calcular $K_{i,j}, 1 \leq i, j \leq m, i \neq j$:
 - Si $w_i^{aux} - w_j^{aux} \leq C \times dw(p_i, p_j)$, entonces $K_{i,j} = 1$
 - Si $w_i^{aux} - w_j^{aux} > C \times dw(p_i, p_j)$, entonces $K_{i,j} = \frac{C \times dw(p_i, p_j)}{w_i^{aux} - w_j^{aux}}$



d.2. Calcular K0 a partir de la expresión: $K0 = \min_{i,j} (K_{i,j})$

d.3. Calcular los valores iniciales de los pesos $w_i^0 := K0 \times w_i^{max}$

e) El número de iteraciones realizadas: $I := 0$.

2. Núcleo del algoritmo. En cada iteración:

a) Asignar $z_i := \emptyset, \forall 1 \leq i \leq m$

b) Para cada unidad (x_j), representada por su centroide $c_j, 1 \leq j \leq n$:

- Hallar p_i tal que $dw(c_j, p_i) \leq dw(c_j, p_s), \forall 1 \leq s \leq m$
- Añadir c_j a z_i

c) Para cada región, $z_i, 1 \leq i \leq m$, calcular:

- Su tamaño $a(z_i)$, $a(z_i) = \sum_{x_j \in z_i} a_j$, donde a_j es el valor del atributo de medida de una unidad j que pertenece a z_i .
- Su coeficiente de error absoluto: $e_i = a(z_i) - A(z_i)$, donde $A(z_i)$ es el tamaño prefijado para la región i y $a(z_i)$ es el tamaño calculado para dicha región.

d) Calcular el nuevo peso de cada región, $z_i, \forall 1 \leq i \leq m$:

- Calcular $K_{i,j}, \forall 1 \leq i, j \leq m, i \neq j$:
 - Si $(w_i + e_i) - (w_j + e_j) \leq C \times dw(p_i, p_j)$, entonces $K_{i,j} = 1$
 - Si $(w_i + e_i) - (w_j + e_j) > C \times dw(p_i, p_j)$, entonces $K_{i,j} = \frac{C \times dw(p_i, p_j) - (w_i - w_j)}{e_i - e_j}$
- Obtener el valor del parámetro K, $K = \min_{i,j} (K_{i,j})$
- Actualizar los valores de los pesos: $w_i^{actual} = w_i^{anterior} + K \times e_i$, donde e_i es el coeficiente de error de la región z_i .

e) Calcular el error de la solución: $E = \max_{i=1}^m \left\{ \frac{e_i}{A(z_i)} \right\}$



f) Asignar $I := I + 1$.

3. Si $I < T$, $K > 0$ y $E > \varepsilon$, volver al paso 2.

Propiedades del modelo:

a) En todo momento se verifica que

$$\sum_{i=1}^m w_i = K0 \sum_{i=1}^m A(z_i)$$

teniendo en cuenta que $\sum_{i=1}^m e_i = 0$

b) Si en un momento dado se verifica que $K = 0$, a partir de ese punto, las soluciones serán siempre las mismas ya que los pesos no se modifican. Para poder buscar una solución mejor habría que aumentar el valor del coeficiente de entrada C .

Tanto en este modelo como el anteriormente propuesto, es necesario una calibración de los coeficientes y parámetros que intervienen en las fórmulas. Un ajuste deficiente de estos elementos posibilita la aparición de un conjunto de errores cuya oscilación en las diferentes iteraciones del bucle puede hacer inestable el proceso, impidiendo que se encuentre una solución válida.

El gráfico siguiente muestra un ejemplo de las zonificaciones obtenidas con este modelo ($C=0.3$ y $\varepsilon=0.1$) en diferentes iteraciones del bucle de cálculo. Tal y como puede observarse, el error máximo E varía hasta estabilizarse, a partir de la iteración 500, sin llegar a generar una solución correcta ya que su valor es superior al de la tolerancia $\varepsilon=0.1$.



Nº de unidades: 15496						
Valor de C	Nº de iteración	Errores relativos de las regiones en la iteración $\{e_i = (a(z_i) - A(z_i)) / A(z_i) * 100\}$				Resultado
0.3	83	z ₁	$e_1 = -37.38\%$	z ₂	$e_2 = -53.53\%$	
		z ₃	$e_3 = -33.63\%$	z ₄	$e_4 = 45.66\%$	
		z ₅	$e_5 = -5.23\%$	z ₆	$e_6 = 64.29\%$	
		z ₇	$e_7 = 39.84\%$	z ₈	$e_8 = 61.09\%$	
		z ₉	$e_9 = -46.95\%$			
		Error máximo E = 0.6429 (> ε)				
	100	z ₁	$e_1 = 150.54\%$	z ₂	$e_2 = -50.19\%$	
		z ₃	$e_3 = -35.57\%$	z ₄	$e_4 = 44.32\%$	
		z ₅	$e_5 = -5.15\%$	z ₆	$e_6 = 35.38\%$	
		z ₇	$e_7 = -30.88\%$	z ₈	$e_8 = 62.96\%$	
		z ₉	$e_9 = -46.07\%$			
		Error máximo E = 1.5054 (> ε)				
	500 y ...	z ₁	$e_1 = -60.65\%$	z ₂	$e_2 = -37.67\%$	
		z ₃	$e_3 = -50.34\%$	z ₄	$e_4 = 35.59\%$	
		z ₅	$e_5 = -2.81\%$	z ₆	$e_6 = 33.12\%$	
		z ₇	$e_7 = 54.97\%$	z ₈	$e_8 = 45.04\%$	
		z ₉	$e_9 = -29.49\%$			
		Error máximo E = 0.6065 (> ε)				

Figura 67. Ejemplo de una zonificación obtenida con el modelo alternativo de solución nº 2 en diferentes iteraciones del bucle de cálculo (C=0.3, ε=0.1).



Como ejemplo de la dificultad de calibrar adecuadamente los parámetros de un modelo, los gráficos siguientes muestran los efectos que se producen al modificar el factor C. A partir de un mismo conjunto de datos se han realizado zonificaciones de 9 regiones, fijando un umbral de $\varepsilon=0.1$ y asignando a C diferentes constantes numéricas.

Al aumentar el valor de este parámetro, si el bucle se detiene en la misma iteración, en este caso la número 100, no se detecta que la solución converja más rápidamente ni que se obtenga un error máximo de menor cuantía.

Nº de unidades : 15496		Nº de iteración de parada: 100		
Valor de C	Errores relativos de las regiones $\{e_i = (a(z_i) - A(z_i)) / A(z_i) * 100\}$			
0.3	z ₁	e ₁ = 150.54%	z ₂	e ₂ = -50.19%
	z ₃	e ₃ = -35.57%	z ₄	e ₄ = 44.32%
	z ₅	e ₅ = -5.15%	z ₆	e ₆ = 35.38%
	z ₇	e ₇ = -30.88%	z ₈	e ₈ = 62.96%
	z ₉	e ₉ = -46.07%	E = 1.505418	
0.4	z ₁	e ₁ = 196.81%	z ₂	e ₂ = -70.77%
	z ₃	e ₃ = -16.64%	z ₄	e ₄ = 91.20%
	z ₅	e ₅ = -6.01%	z ₆	e ₆ = 46.08 %
	z ₇	e ₇ = -52.92%	z ₈	e ₈ = -11.42%
	z ₉	e ₉ = -53.56%	E = 1.9680786	
0.6	z ₁	e ₁ = 149.81%	z ₂	e ₂ = -47.86%
	z ₃	e ₃ = -38.32%	z ₄	e ₄ = 42.53%
	z ₅	e ₅ = -5.05%	z ₆	e ₆ = 33.73%
	z ₇	e ₇ = -31.12%	z ₈	e ₈ = 64.63%
	z ₉	e ₉ = -44.59%	E = 1.4980692	
0.7	z ₁	e ₁ = 187.82%	z ₂	e ₂ = -32.58%
	z ₃	e ₃ = -52.02%	z ₄	e ₄ = 31.36%
	z ₅	e ₅ = -6.38%	z ₆	e ₆ = 24.21%
	z ₇	e ₇ = -55.74%	z ₈	e ₈ = -76.03%
	z ₉	e ₉ = 14.96%	E = 1.8782	
0.8	z ₁	e ₁ = 149.83%	z ₂	e ₂ = 18.75%
	z ₃	e ₃ = -14.82%	z ₄	e ₄ = -0.013%
	z ₅	e ₅ = -1.144%	z ₆	e ₆ = 9.49%
	z ₇	e ₇ = -81.74%	z ₈	e ₈ = 147.06%
	z ₉	e ₉ = -45.71%	E = 1.49837	

Tabla 14. Tabla con los valores de errores relativos y error máximo correspondientes a zonificaciones generadas con el modelo alternativo de solución nº 2, para diferentes valores de C y $\varepsilon=0.1$.



El valor de C , junto con el de otros parámetros, también puede ocasionar la desaparición de una o varias de las regiones del territorio en alguna de las iteraciones del proceso de cálculo. En la figura siguiente se muestran varios ejemplos de zonificaciones en las que algunas regiones son un conjunto vacío, tal y como sucede con la región 8 para $C=0.4$ en la iteración nº 100, y con las regiones 8 y 1 para $C=0.6$ en las iteraciones nº 100 y nº 500 respectivamente.

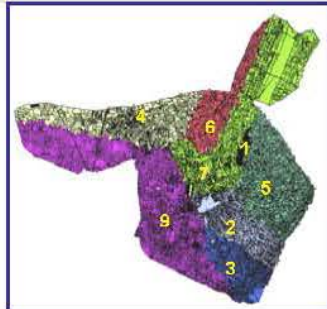
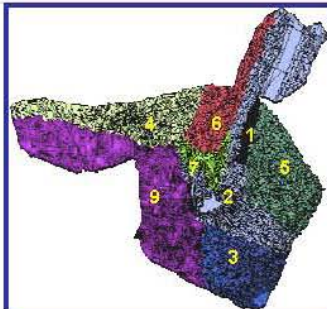
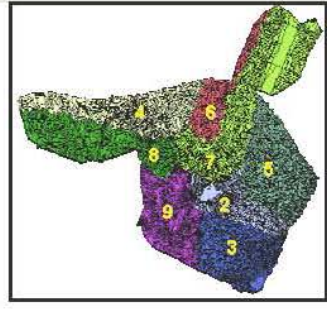
Nº de unidades: 15496						
C	Nº de iteración	Errores relativos de las regiones en la iteración $\{e_i=(a(z_i)-A(z_i)) / A(z_i) * 100\}$				Resultado
0.4	500	z_1	$e_1 = -89.82\%$	z_2	$e_2 = -31.52 \%$	
		z_3	$e_3 = -50.34\%$	z_4	$e_4 = 1.27\%$	
		z_5	$e_5 = 1.21\%$	z_6	$e_6 = 4.32\%$	
		z_7	$e_7 = 74.85\%$	z_8	$e_8 = 100\%$	
		z_9	$e_9 = 41.03\%$	$E = 1 (> \varepsilon)$		
0.6	100	z_1	$e_1 = -69.41\%$	z_2	$e_2 = 134.87\%$	
		z_3	$e_3 = -12.54\%$	z_4	$e_4 = -1.64\%$	
		z_5	$e_5 = -7.35\%$	z_6	$e_6 = 14.93\%$	
		z_7	$e_7 = -73.36\%$	z_8	$e_8 = 100\%$	
		z_9	$e_9 = 34.99\%$	$E = 1.3487 (> \varepsilon)$		
0.6	500	z_1	$e_1 = 100\%$	z_2	$e_2 = -33.23\%$	
		z_3	$e_3 = -1.03\%$	z_4	$e_4 = -0.38\%$	
		z_5	$e_5 = -1.66\%$	z_6	$e_6 = -18.09\%$	
		z_7	$e_7 = 88.36\%$	z_8	$e_8 = 138.70\%$	
		z_9	$e_9 = -47.09\%$	$E = 1.387 (> \varepsilon)$		

Figura 68. Ejemplo de zonificaciones, obtenidas con el modelo alternativo de solución nº 2, donde algunas regiones son un conjunto vacío ($\varepsilon=0.1$).



3.5 Resumen del capítulo

En este capítulo se han abordado los siguientes temas:

- Análisis de las características y restricciones de los problemas de partición espacial asociados a la gestión de sistemas extensivos agropecuarios. A partir de este estudio se han determinado los criterios necesarios para desarrollar y verificar el modelo que se implementará en la aplicación prototipo.
- Diseño de un modelo de solución para problemas de partición espacial cuyas características sean similares a las del caso objeto de estudio. Este modelo se basa en una *versión discreta del diagrama de Voronoi con peso aditivo adaptativo* y permite la partición de un espacio bidimensional en regiones de un tamaño predeterminado, considerando tanto la posición como el peso de cada uno de los generadores. El espacio considerado se reduce a los centroides o puntos representativos de las unidades básicas de área, entre los que se encuentran los generadores del diagrama. La selección y ubicación de estos puntos puede afectar los resultados obtenidos. El método consiste básicamente en resolver repetidamente un tradicional DVPA, de forma que los pesos de cada generador se actualizan en cada iteración a fin de ajustar el tamaño de cada zona a un valor predeterminado. Para ello se modifica el valor de la distancia existente entre cada uno de ellos y el resto de los puntos del espacio. Como función de medida de distancias se utiliza la *métrica del camino más corto*, ya que su aplicación garantiza la formación de regiones conexas en la solución final. Por último, dado que los límites de las zonas han de adaptarse a los de sus unidades componentes, antes de construir dichas zonas se procede a sustituir los puntos por las geometrías originales de área.

En el modelo se incluye un *parámetro L adaptativo* para controlar la velocidad de convergencia del algoritmo. El valor de L se calcula en cada iteración del proceso de cálculo y su valor depende de: la configuración espacial de los centroides de las unidades básicas, de la localización de los generadores y de los errores relativos de cada zona en cada iteración. El uso de un parámetro adaptativo, frente a una constante numérica predefinida, permite encontrar, en un mayor número de casos, una zonificación ajustada a los criterios de partida. Además, este parámetro *evita la inestabilidad del proceso de cálculo* cuando existe una solución que verifica dichos criterios.



- Los resultados obtenidos muestran que el modelo es capaz de:
 - **gestionar un elevado número de unidades superficiales** en formato vectorial (por ejemplo, a partir de 21037 unidades se ha generado una zonificación de 6 regiones en aproximadamente 35 minutos, usando un equipo con Windows 2000 en un procesador AMD Athlon 64 3400, 2.4 GHz y 1 GB de memoria RAM), y
 - **generar**, a partir de un conjunto prefijado de generadores, **soluciones que convergen en un tiempo razonable** y verifican las restricciones impuestas.

No obstante, se han encontrado casos en los que el algoritmo no converge y el proceso de cálculo se hace inestable, de forma que los valores de los pesos y de los errores relativos de las regiones comienzan a oscilar sin llegar a una solución satisfactoria. Aunque el algoritmo no pueda generar una zonificación ajustada a las especificaciones de partida, el modelo puede encontrar una partición espacial de menor error. Si se calcula el Error Medio de los valores absolutos de los errores relativos, la iteración en la que dicha medida toma el valor mínimo, corresponde a una de las mejores zonificaciones generadas en el bucle o proceso iterativo de cálculo.

- El análisis de las ventajas y limitaciones del modelo indica que los diagramas de Voronoi, frente a otros métodos de solución, son una alternativa válida y eficaz en problemas de partición espacial donde las zonas han de ajustarse a un tamaño prefijado.
- El modelo diseñado se ha implementado en una aplicación prototipo, escrita en el lenguaje de programación C#, que integra técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) -para la carga, almacenamiento, gestión, visualización y análisis espacial de los datos- con una heurística basada en los Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo (DVPAA) -para resolver el problema de partición espacial-. El prototipo se ha desarrollado como una aplicación independiente, usando la biblioteca de Objetos COM de GeoMedia Professional v.6.1. No obstante, esta aplicación se puede transformar en una librería (*.dll) e integrarse en el entorno de GeoMedia Professional, como una nueva herramienta de segmentación espacial.



4. APLICACIÓN DEL MODELO AL CASO DE ESTUDIO



*“Si buscas resultados distintos,
no hagas siempre lo mismo”*
(Albert Einstein)

4 APLICACIÓN DEL MODELO AL CASO DE ESTUDIO

El objetivo de este capítulo es evaluar la aplicación prototipo resultado de la implementación del algoritmo diseñado en esta tesis. El prototipo integra técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con un algoritmo heurístico basado en la teoría de los Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo (DVPAA). Para facilitar los procesos de verificación y control en el diseño del algoritmo y permitir la evaluación del prototipo, se ha generado un sistema de información geográfica para la gestión de los recursos agrícolas y ganaderos de la zona de estudio. Los datos originales corresponden al parcelario catastral de los tres municipios de Toledo utilizados como caso de estudio (El Romeral, Corral de Almaguer y Lillo). Las parcelas catastrales, representadas según el modelo vectorial, constituyen las unidades básicas que serán agregadas en las zonas o polígonos de pasto.

Los resultados de los experimentos realizados demuestran la validez del modelo de solución y permiten confirmar la hipótesis establecida en el capítulo 1.

4.1 Área de estudio

El área de estudio elegida para realizar el proyecto de SIG está situada en la zona centro de España, en la región de La Mancha, en la meseta del sur de Castilla, y comprende tres municipios de la provincia de Toledo (de oeste a este: El Romeral, Lillo y Corral de Almaguer).



Figura 69. Localización del área de estudio: (a) Comunidad de Castilla-La Mancha. (b) Provincia de Toledo.

La zona ocupa una superficie total de 558.2 km² y su rango de altitudes varía entre los 650 y los 750 m. La extensión de cada uno de los municipios es la siguiente:



MUNICIPIO	SUPERFICIE (ha)
<i>Lillo</i>	15143
<i>El Romeral</i>	7964
<i>Corral</i>	32715

Tabla 15. Datos de superficie de los municipios del área de estudio.

El clima es Mediterráneo, con una temperatura media anual entre 13° y 15° C, y un agudo contraste entre el frío invierno y el caluroso verano. La precipitación media anual es de 400 a 450 mm y corresponde a un bioclima mesomediterráneo seco. La litología dominante son las rocas sedimentarias calizas y las margas del Mioceno. Las margas son más o menos ricas en yeso en la parte oeste del área de estudio. En el noroeste del municipio de Corral de Almaguer predominan los sedimentos del Plioceno. En el centro de la zona y en el borde sur del municipio de Lillo emergen algunas colinas cuarzosas de escasa altitud. Por último, los rasgos topográficos más relevantes corresponden a las laderas moderadamente escarpadas que flanquean los ríos Cedron, en el límite norte, y Riansares, en la parte este del área de estudio.

El paisaje que se observa corresponde a una zona prácticamente deforestada y transformada desde hace siglos por la explotación agrícola. La rica naturaleza del terreno en la llanura topográfica hizo posible un sistema extensivo de cultivos que actualmente se extiende por el 95% del área, exceptuando las pequeñas zonas ocupadas por colinas o escarpadas laderas. Además, existe un tradicional sistema agropecuario (de rebaños de ovino y caprino) cuyos recursos alimenticios incluyen las tierras no arables (pastos naturales, eriales, bosque y matorral mediterráneo) y los residuos agrícolas. Las parcelas ocupadas por olivos, viñedos y regadío están legalmente excluidas del uso pastoral.

Las características climáticas, litológicas, geomorfológicas y de usos del suelo del área de estudio son muy representativas de toda la región de La Mancha que, desde el punto de vista administrativo, constituye el territorio principal de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha. En esta región predominan las propiedades con un tamaño medio inferior a 10 ha que, por lo general, se reparten en parcelas no contiguas. La reducida dimensión de las explotaciones agrícolas, la elevada parcelación y los condicionantes climáticos de la llanura castellana impiden la tenencia y mantenimiento de rebaños de un tamaño adecuado en fincas propias. En esta estructura, la mayoría de los agricultores, dedicados básicamente a la producción de cereales, no pueden mantener su propio rebaño. Por este motivo, la producción, tanto de cereales en secano como de leche y carne de ovino, se realiza sobre las mismas unidades o parcelas de suelo agrícola (Caballero 2001). Estas parcelas, de reducidas dimensiones y con diferentes aprovechamientos, se agrupan, dentro de cada municipio, en unidades de mayor superficie conocidas por el nombre de polígonos de pastos. En estos polígonos, los ganaderos disponen de una gran variedad de recursos (rastroyeras anuales de cereales y de leguminoso, rastroyeras de girasol, barbechos pastizales naturales, eriales...) que provienen de un elevado número de agricultores.



En el sistema agropecuario descrito están implicados dos grupos sociales: los agricultores, que son propietarios de las explotaciones con recursos pastorales, y los ganaderos, que son dueños de rebaños pero suelen carecer de terreno propio (Caballero 2001). Por este motivo, el suministro de nutrientes para el ganado depende básicamente de los residuos agrícolas del entorno. Ante esta situación, los ganaderos sin tierra, a modo de compensación, pagan a los agricultores una tasa de pastoreo por hectárea. El sistema que permite poner de acuerdo a los agricultores y ganaderos está intervenido por las administraciones que han creado las denominadas Comisiones Locales de Pastos. Estas Comisiones se encargan de la gestión de los recursos pastorales, distribuyendo los pastos del municipio en polígonos que son asignados a los ganaderos. El marco legal que regula esta gestión diferencia tres tipos de recursos (Caballero et al. 2004):

- *Polígonos parcelarios*: recursos pastorales arrendados a ganaderos sin tierra, de cuya asignación se encarga la Comisión Local de Pastos (50% de la Superficie Agrícola Total (SAT) en Castilla-La Mancha).
- *Polígonos segregados*: recursos pastorales que están fuera del sistema de gestión establecido para los polígonos parcelarios, es decir, que están excluidos de la transferencia de los derechos de pasto. Estos recursos se encuentran en propiedades de agricultores que superan las 200 ha (alrededor del 30% de la SAT).
- Terreno arable ocupado por olivos, viñedos y parcelas de regadío, donde el pastoreo está prohibido por ley (alrededor del 20% de la SAT).

El sistema legal discrimina a los agricultores propietarios de pequeñas y grandes explotaciones en función de la transferencia de los derechos de pasto. Según la ley actual, sólo los grandes propietarios pueden mantener un rebaño de tamaño adecuado, sin embargo, este colectivo no ha mostrado ningún interés en la gestión ganadera, como demuestra el hecho de que alrededor del 10% de los rebaños se mantienen en polígonos segregados frente al 90% que lo hacen en polígonos parcelarios. En este régimen de propiedad, las grandes extensiones de terreno con recursos pastorales están desaprovechadas y los rebaños se concentran en las tierras arrendadas a los agricultores, en una proporción 6 veces superior a las tierras no arrendadas.

También hay que destacar el hecho de que, en Castilla-La Mancha, el número de agricultores en activo ha pasado del 27% en 1980 a un 10% en el año 2000. Por otro lado, en los 12 años anteriores al 2002, el número de ganaderos ha disminuido a una tasa del 3% anual¹, si bien el tamaño medio de los rebaños ha aumentado de unas 200 a algo más de 400 ovejas (Caballero et al. 2004). Estos hechos, junto con el afianzamiento del Consejo Regulador de

¹ En los municipios del área de estudio, el número de ganaderos ha pasado de 33 en 1998 a 24 en el año 2004. En este caso, la tasa de descenso es del 4.5% anual.



Productores de Queso Manchego indican que, actualmente, el sector ganadero parece consolidarse más en el mercado laboral que el sector agrario.

En definitiva, la estructura descrita presenta características de los sistemas agropecuarios (en lo que se refiere principalmente al uso de residuos agrícolas para alimentación del ganado) y de los sistemas extensivos (la proporción de animales –ovejas- estabulados es pequeña frente a los que tienen disponible grandes extensiones de terreno no vallado –los polígonos de pastos-). Estas características justifican el nombre de “sistema extensivo del tipo cereal-ovino”. Además, esta estructura tiene algunas singularidades propias que, con el paso del tiempo, han convertido el sistema en ineficaz. Por un lado, dentro de los polígonos las parcelas con recursos disponibles se intercalan con otras de acceso restringido al ganado, motivo que justifica la presencia continua del pastor como guía de los rebaños en sus desplazamientos para conseguir alimento. Por otra parte, dado que los pastores no son propietarios de la tierra, suelen tener sus apriscos cerca de los núcleos de población, por lo que precisan mover frecuentemente sus rebaños desde estos lugares hacia los polígonos de pastos. Estos hechos no sólo endurecen considerablemente las condiciones de trabajo, sino que hacen ineficaz el sistema desde el punto de vista energético, ya que una parte de la energía suministrada por la alimentación se consume en los desplazamientos que realiza el ganado (Caballero et al. 2004).



4.2 Elaboración de un SIG de recursos agrarios del área de estudio

Esta sección describe fundamentalmente los procesos correspondientes a la elaboración de un proyecto de SIG, haciendo especial hincapié en las fases de integración y edición de los datos que constituyen la base geográfica del proyecto.

Según el National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA), un Sistema de Información Geográfica (SIG) es “un sistema de hardware, software y metodologías o procedimientos diseñados para facilitar la obtención, modelado, gestión, manipulación, análisis, representación y salida de datos espacialmente referenciados, y para resolver problemas complejos de planificación y gestión”².

Desde una perspectiva más general, un SIG puede definirse como un sistema compuesto de recursos físicos (hardware), lógicos (software), recursos humanos, datos y métodos.



Figura 70. Componentes de un SIG.

Desde un punto de vista funcional, un SIG es una herramienta informática constituida por un conjunto de programas que permiten realizar las siguientes funciones:

- ✓ Adquisición y captura de datos geográficos, datos procedentes de diversas fuentes y con formatos y características diferentes.
- ✓ Almacenamiento estructurado de datos espaciales y temáticos de los elementos geográficos, así como de las relaciones existentes entre ellos.
- ✓ Integración y edición de múltiples conjuntos de datos, para obtener una base de datos geográfica homogénea, continua y coherente con la realidad geográfica que representa.
- ✓ Realización de consultas y análisis espacial y temático de los datos, lo que permite la obtención de información derivada.
- ✓ Salida de resultados.

²Goodchild, M. F. and K. K. Kemp, eds. 1990. NCGIA Core Curriculum in GIS. (<http://www.geog.ubc.ca/courses/ldink/gis.note/ncgia/toc.html>)



En la actualidad, el interés por la información geográfica³ ha crecido considerablemente. Los SIG son susceptibles de ser usados en cualquier proyecto cuyo objetivo principal sea gestionar algún tipo de información georreferenciada. De hecho, estos sistemas se utilizan para elaborar proyectos en diferentes campos de aplicación, tales como:

Campos de aplicación	
- Catastro	- Gestión de Riesgos / Catástrofes
- Servicios de Administración Pública: local, regional o nacional	- Servicios de Emergencia
	- Redes de Gas/Electricidad
- Inteligencia Militar	- Gestión del Agua
- Gestión Medioambiental	- Geomarketing
- Planeamiento Territorial	- Telecomunicaciones
- Gestión sanitaria	- Logística de Transporte
- Agricultura	- etc

Tabla 16. Ejemplos de campos de aplicación de los Sistemas de Información Geográfica.

La elaboración de cualquier proyecto de SIG, independientemente del soporte o herramienta informática utilizada, implica la realización de las fases que se indican en la figura siguiente:

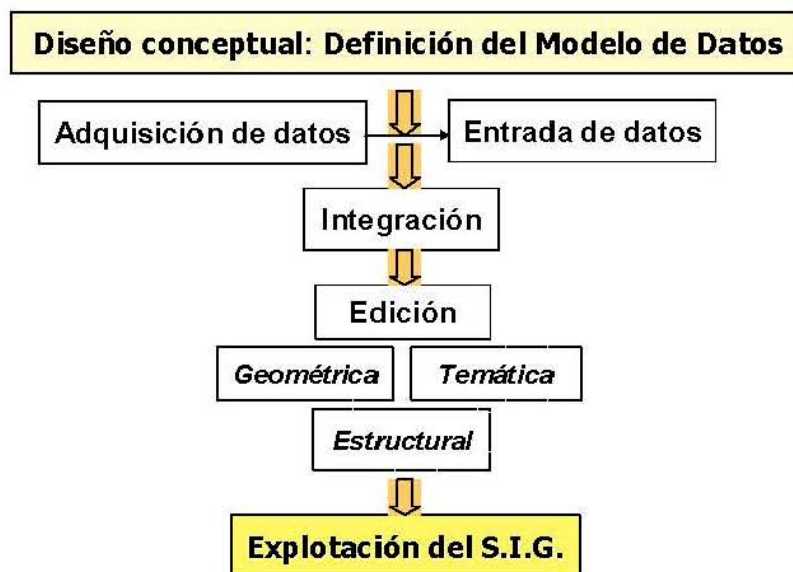


Figura 71. Fases en la elaboración de un proyecto de SIG.

³ Es la información referida a entes o fenómenos, que ocurren sobre la corteza terrestre o en sus proximidades, en relación con los cuales es relevante el conocimiento de su posición, referida a un sistema vinculado a la Tierra.



4.2.1 Diseño conceptual

La primera fase en la elaboración de un proyecto SIG corresponde al diseño conceptual o definición del modelo de datos. Un modelo puede definirse como una representación abstracta y simplificada de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. El diseño conceptual consiste en determinar los objetivos generales y específicos de la aplicación a desarrollar, permitiendo focalizar los aspectos de la realidad que se consideran relevantes para el proyecto. Una vez fijados los objetivos, hay que definir los posibles tipos de consultas, espaciales o temáticas, cuya respuesta habrá de ser facilitada por el sistema. Tras analizar qué información sería necesaria para dar respuesta a las cuestiones planteadas, es posible deducir el conjunto de datos espaciales y temáticos que debe incluir el proyecto y que constituyen la base para definir el modelo a nivel conceptual. En este proceso se pueden utilizar diferentes modelos genéricos, tales como el Entidad/Relación (E/R) –utilizado en esta tesis– y el Orientado a Objetos (O-O), así como sus correspondientes herramientas de modelado, el Diagrama E/R y el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) respectivamente.

El modelo Entidad/Relación permite representar el mundo real como una colección de objetos básicos (entidades) y de relaciones entre ellos. El modelo, tal y como fue propuesto por su autor (Chen 1976), establece los siguientes conceptos básicos:

- Entidad: representación individualizada de un objeto, real o abstracto, considerado de interés en el modelo.
- Atributo: elemento de información de una entidad, correspondiente a cualquiera de sus propiedades o características. Los valores de los atributos están asociados a Dominios.
- Relación: cualquier asociación que pueda establecerse entre entidades (de la misma clase o de clases diferentes).
- Clases de entidades: conjunto de entidades homogéneas, con atributos, dominios y relaciones comunes.

Al aplicar este modelo al ámbito geográfico, se puede restringir el concepto de Entidad a Entidad Geográfica. A continuación se presentan dos definiciones de este término:

- Entidad geográfica: “Elemento que tiene al menos una propiedad que toma valores geográficos” (Open Geospatial Consortium⁴ (OGC)).

⁴ El Open Geospatial Consortium (OGC) es un organismo creado en 1994 que agrupa (en febrero de 2009) a 372 organizaciones públicas y privadas. Su objetivo es la definición de estándares abiertos e interoperables dentro de los Sistemas de Información Geográfica y de la World Wide Web.



- Entidad geográfica: “Abstracción de un fenómeno del mundo real asociado a una posición relativa a la Tierra o superficie terrestre” (Norma ISO⁵ 19101 Modelo de Referencia).

La identificación de las clases de entidades es el resultado de aplicar los siguientes criterios básicos a cada fenómeno analizado:

- ¿Es de importancia fundamental para el estudio que se pretende llevar a cabo?
- ¿Tiene propiedades significativas que deban considerarse como atributos?
- ¿Tiene relación con algún otro fenómeno o entidad?

Si se verifica cualquiera de los tres supuestos anteriores, será preciso definir una clase de entidad para la representación del fenómeno analizado.

Una vez establecidas las clases de entidades que van a incluirse en el proyecto, es necesario definir la información que llevará asociada cada una de ellas. Esta información está constituida por un conjunto de datos temáticos o atributos y/o un conjunto de datos espaciales.

Para completar la definición formal del modelo Entidad-Relación, hay que establecer las relaciones existentes entre las entidades (de la misma o diferente clase). Las relaciones pueden ser de dos tipos:

- Espaciales, en cuyo caso el software SIG se encarga fundamentalmente de su gestión y mantenimiento.
- No espaciales. Este tipo de relaciones han de ser definidas por el usuario en función de las asociaciones que se consideren necesarias en el proyecto.

Para la representación de las clases de entidades es preciso elegir un modelo espacial de tipo continuo o discreto, que se implementará en una estructura de datos raster o vectorial, respectivamente. Los principales factores que determinan la elección del modelo son: las necesidades de precisión posicional y el tipo de análisis espacial a realizar. En función de estos criterios se elige el modelo más adecuado para desarrollar el proyecto SIG. Las estructuras raster y vectorial no son excluyentes y, en la mayoría de los casos, pueden coexistir en una aplicación informática. Con independencia del modelo seleccionado, para determinar la posición espacial de una entidad geográfica, hay que especificar los parámetros de un sistema de referencia vinculado a la Tierra, es decir, de un Sistema de Referencia Geodésico, también denominado

⁵ La Organización Internacional de Normalización (ISO), fundada el 23 de febrero de 1947 como una organización no gubernamental, se encarga de establecer estándares o normas para el mundo industrial y comercial. La mayor parte del trabajo de la ISO la realizan los comités técnicos, subcomités y grupos de trabajo (<http://www.iso.org>). Los principales productos de la ISO son las Normas Internacionales. Las Normas Internacionales de Información Geográfica están a cargo del organismo ISO/TC211 (<http://www.isotc211.org>), cuyo objetivo es establecer una normativa de referencia en el campo de la información geográfica digital. Uno de los trabajos del ISO/TC211 es la Normativa de Referencia en Información Geográfica ISO 19100 que trata sobre los métodos, herramientas y servicios para la gestión de datos, adquisición, procesamiento, análisis, acceso, presentación y transferencia de información geográfica en formato digital entre diferentes usuarios, sistemas y localizaciones. ISO 19100 engloba la Norma General ISO 19101 Modelo de Referencia.

Sistema de Referencia de Coordenadas en la Norma ISO 19111⁶. De esta forma, cada posición puede ser descrita por un conjunto de coordenadas que, serán inequívocas, sólo cuando el sistema de referencia en el que están expresadas se ha definido completamente. Según la norma anterior, la información geográfica debe cumplir los siguientes requisitos:

- Las coordenadas dadas en un conjunto específico de datos deben pertenecer al mismo sistema de referencia de coordenadas.
- Cada conjunto de datos debe llevar asociado una descripción con información suficiente de su sistema de referencia de coordenadas. Esta información varía con el tipo de sistema de coordenadas y con el tipo de datum.

En definitiva, la representación espacial de las entidades geográficas en un SIG requiere la especificación de los siguientes parámetros:

- Datum: parámetro o conjunto de parámetros que definen la posición del origen, la escala y la orientación de un sistema de referencia de coordenadas.
- Sistema de referencia de coordenadas: sistema de coordenadas que se relaciona con el mundo real mediante un datum.
- Sistema de Coordenadas: conjunto de reglas matemáticas que especifican cómo deben asignarse las coordenadas a los puntos o localizaciones.
- Sistema de Proyección: sistema de representación gráfico que establece una relación ordenada entre los puntos de la superficie curva de la Tierra y los de una superficie plana (mapa).

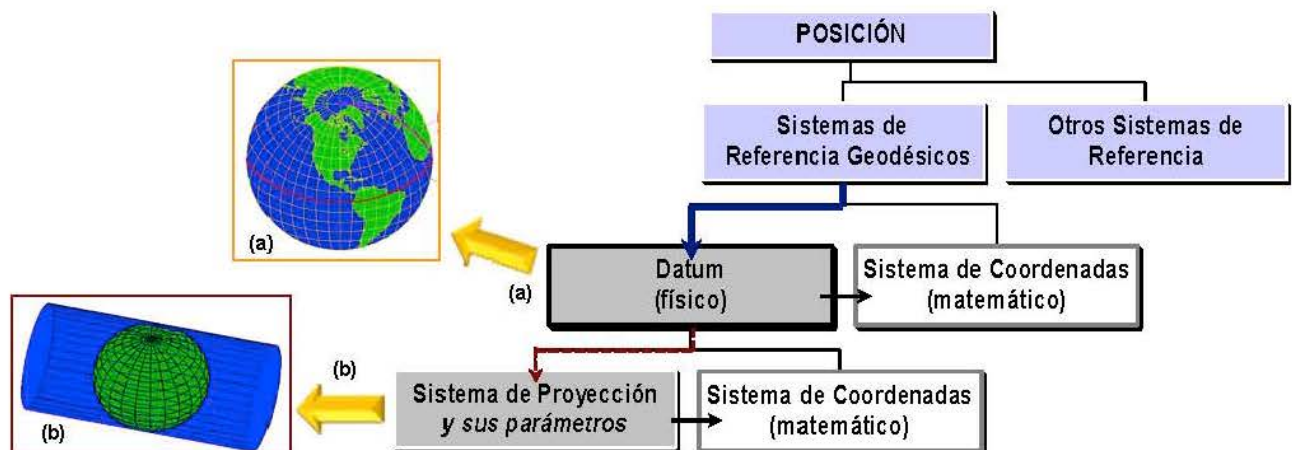


Figura 72. Elementos para especificar la posición espacial.

⁶ En la Norma ISO 19111 (Sistemas de referencia espaciales por coordenadas) se recogen las siguientes definiciones:

- **Sistema de Referencia de Coordenadas (CRS):** Sistema de coordenadas que está referido al mundo real a través de un datum.
- **Sistema de Coordenadas:** Conjunto de reglas matemáticas que especifican cómo deben asignarse las coordenadas a los puntos.



Por último, los objetivos establecidos en un proyecto de SIG determinan unas condiciones en cuanto a la precisión de los resultados en los análisis que se efectúen. A su vez, estos requisitos fijarán unos estándares de calidad para los datos de entrada. Recíprocamente, puede ocurrir que para un proyecto específico haya que utilizar unos datos de entrada de precisión heterogénea. En este caso, la precisión resultante para el conjunto se corresponderá con la de los datos menos precisos, siendo necesario evaluar si esta precisión es suficiente para los objetivos que se pretenden conseguir.

Tras determinar los objetivos y establecer los posibles tipos de consultas cuya respuesta habrá de facilitar este proyecto de SIG, se ha definido un modelo de datos formado por cinco clases de entidades de los tipos siguientes:

- a) Clases con representación espacial y datos temáticos asociados:
 - municipios,
 - parcelas (catastrales) y
 - polígonos de pasto.
- b) Clases sin representación espacial y con datos temáticos asociados:
 - unidades catastrales de usos del suelo y
 - unidades agrícolas de usos del suelo (registrados en el SIGPAC).

Las clases de tipo b se definen para almacenar una serie de atributos o características, necesarios en la gestión agropecuaria de este tipo de aplicaciones. La cardinalidad de las relaciones entre estas dos clases y la clase Parcelas es del tipo N:N, es decir, 1...N:1...N (una parcela puede tener recintos de diferente aprovechamiento o uso, y un uso puede estar presente en diferentes parcelas de la zona de estudio). En el diagrama E/R esta propiedad aparece con el valor 1:N (1: 1...N), ya que en estas aplicaciones el atributo de medida de las unidades básicas de información ha de tener un valor único. En este proyecto, por las razones que se explican en las secciones siguientes, dichas unidades son las parcelas catastrales.

A continuación se presenta el diagrama E/R correspondiente al modelo de datos diseñado, las tablas con los atributos definidos para las clases de entidades y los parámetros espaciales del proyecto realizado en esta tesis.

Con respecto al diagrama E/R del modelo, hay que indicar que las clases *provincias* y *polígonos catastrales* que aparecen en él, sólo se han incluido para representar la jerarquía de relaciones o estructura que utiliza Catastro en la identificación de las unidades territoriales (parcelas). Este proyecto no requiere la definición de dichas clases, ya que carecen de interés en la gestión agropecuaria (polígonos catastrales) o bien no tienen presencia en el área de estudio (provincias).



DIAGRAMA E/R DEL MODELO DE DATOS

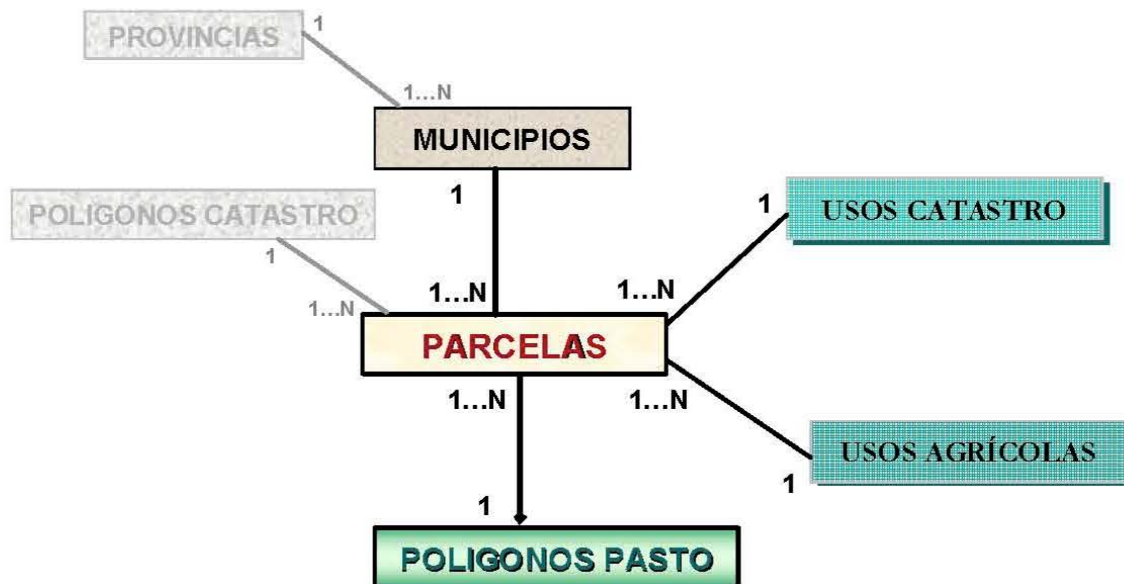


Figura 74. Diagrama E/R (versiones inicial y final) del modelo de datos del proyecto de SIG.

Las tablas siguientes muestran el conjunto de atributos definidos para cada una de las clases de entidades del modelo de datos.

MUNICIPIOS		
Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
CODIGO	Número (int)	Identificador numérico de Catastro para el municipio. Clave primaria
MUNICIPIO	Texto (50)	Nombre del municipio
S_T	Número (real)	Superficie total del municipio en hectáreas
SAU	Número (real)	Superficie agrícola útil. Representa la superficie total menos la superficie no utilizable
S_P	Número (real)	Superficie pastoral. Representa la SAU susceptible de aprovechamiento pastoral
SFE	Número (real)	Superficie forrajera equivalente. Representa el resultado aditivo de multiplicar los recursos pastorales o forrajeros por su correspondiente coeficiente forrajero (CF). Dado que una hectárea de SFE equivale al mantenimiento de 1 oveja durante un año, las hectáreas de SFE representa también el número de cabezas potenciales en el municipio
Cabezas potenciales	Número (int)	Equivalente al valor entero del número de hectáreas de SFE
Cabezas reales	Número (int)	Son las cabezas reales que indica la base de datos (del 2003) de ganaderías censadas en el registro del Servicio de Ganadería de la JCCM. Las cabezas reales incluyen tanto a ovino como caprino.
RATIO	Número (real)	Cociente entre N° de cabezas reales y N° de cabezas potenciales. Un cociente inferior a 1 podría indicar infrautilización y un cociente superior podría indicar sobrepastoreo.

Tabla 17. Atributos definidos para la clase Municipios.



USOS CATASTRALES		
Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
ID_CULTIVO	Autonumérico	Identificador autonumérico del uso de suelo. Clave primaria del sistema
DESCRIPCIÓN	Texto(50)	Descripción literal más detallada del uso
CULTIVO	Texto(25)	Descripción literal del uso (fuente: Catastro)
Clase_catastro	Texto(5)	Identificador alfanumérico (siglas) del uso (fuente: Catastro)

Tabla 18. Atributos definidos para la clase Usos Catastrales.

USOS AGRÍCOLAS		
Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
ID_USO	Autonumérico	Identificador autonumérico del uso de suelo agrícola o tipo de cultivo. Clave primaria del sistema
USO_AGRICOLA	Texto(25)	Descripción literal del uso agrícola (fuente: SIGPAC)
TIPO_FORRAJE	Texto(25)	Descripción del tipo de forraje procedente del uso agrícola (fuente: LACOPE)
COEFICIENTE_F	Número (real)	Valor del coeficiente o unidad forrajera correspondiente a 1 ha del uso agrícola (fuente: LACOPE)
Clase_agrícola	Número (int)	Identificador numérico único del uso agrícola

Tabla 19. Atributos definidos para la clase Usos Agrícolas.

PARCELAS		
Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
ID	Autonumérico	Identificador autonumérico de parcela. Clave primaria del sistema
MUNICIPIO	Número (int)	Identificador numérico de Catastro para el municipio
POLIGONO	Número (int)	Identificador numérico de Catastro para el polígono catastral (valor numérico único dentro del municipio, puede repetirse en otros municipios)
PARCELA	Número (int)	Identificador numérico de Catastro para la parcela (identificador que se repite en parcelas de otros polígonos)
SUPERFICIE_HA	Número (real)	Superficie total de la parcela en hectáreas
Uso_Catastro	Texto (5)	Identificador alfanumérico (siglas) del uso predominante en la parcela (fuente: Catastro)
Uso_Agrícola	Texto(25)	Descripción literal del uso agrícola (fuente: SIGPAC) ⁷
FAE	Número (real)	Valor correspondiente a la superficie forrajera equivalente de la parcela
Pol_Pasto	Número (int)	Identificador numérico del polígono de pasto al que pertenece la parcela

Tabla 20. Atributos definidos para la clase Parcelas.

⁷ Este campo puede sustituirse por el de Clase_agrícola (identificador numérico único del uso agrícola predominante en la parcela (fuente: SIGPAC).



Por último, la representación de las clases de entidades se realizará con una estructura vectorial, utilizando los siguientes parámetros espaciales:

Sistema de Referencia del proyecto		
Nombre		GCS_European_1950
Datum		ED-50
	Elipsoide	Internacional 1924 (Hayford)
Sistema de Proyección		UTM
	Parámetros proyección	Huso: 30; Hemisferio: Norte
Precisión / Escala		
Proyecto SIG		1 / 5000
Fuentes de datos espaciales		
	Parcelario rústica	1 / 5000
	Ortofotos SIGPAC	1 / 5000

Tabla 21. Parámetros para la representación espacial de las entidades del proyecto.



4.2.2 Fuentes de datos

La utilización de modelos en la fase de diseño conceptual sirve para determinar el conjunto de datos que hay que introducir en el proyecto, y la estructura que con la que han que de ser almacenados para que se constituyan en información, en este caso, información geográfica. Después de esta fase hay que proceder a:

- La recopilación y evaluación de los datos existentes especificados en el modelo.
- La generación de los datos que no existan y estén especificados en el modelo.
- La carga de todos los datos anteriores en el sistema o equipo informático.

Para gestionar adecuadamente los diferentes conjuntos de datos de entrada es conveniente especificar algunos metadatos⁸ de interés, que permitan registrar información relativa a su procedencia, características y estado. La tabla siguiente recoge algunos de los metadatos más importantes para la descripción de datos:

Metadatos		
<i>Identificación</i>	Nombre y título del conjunto de datos	
	Descripción del conjunto de datos	
	Dominio o extensión geográfica	
	Punto de contacto, persona o entidad de contacto	
	Estatus de compleción (si no está completo, qué elementos faltan)	
<i>Formato</i>	Tipo de formato original y de almacenamiento	
<i>Origen</i>	Datos temáticos	Datos espaciales
	Linaje: fuentes de datos	
	Procesos o métodos para la obtención de los datos	
		Precisión de datos (horizontal y vertical)
		Escala de representación
		Sistema de Referencia
<i>Estado</i>	Fecha de elaboración	
	Fechas de actualización de datos	
	Controles de calidad (fiabilidad de datos)	
<i>Información sobre el distribuidor</i>	Nombre y dirección del distribuidor de los datos	
	Responsabilidades del distribuidor	
	Procedimiento para acceder a los datos	

Tabla 22. Tabla de metadatos básicos.

⁸ Metadato:

Definición 1: “datos sobre datos” o “informaciones sobre datos”.

Definición 2: “toda aquella información descriptiva sobre el contexto, calidad, condición o características de un recurso, dato u objeto que tiene la finalidad de facilitar su recuperación, autenticación, evaluación, preservación e interoperabilidad”.



Los metadatos, en resumen, deben servir para preservar la historia de los datos, para mantener un inventario de la información disponible y posibilitar su localización y acceso.

En la elaboración del proyecto SIG de esta tesis se han empleado los siguientes conjuntos de datos:

- a) El **catastro de rústica**, en formato digital, correspondiente a los municipios del área de estudio (Corral de Almaguer, Lillo, El Romeral) es la **principal fuente de datos**. Esta información procede de la Dirección General de Catastro y consta de una serie de ficheros en formato Shapefile del año 2005, cuyos metadatos más significativos son los siguientes:

Metadatos del catastro de rústica	
Identificación y descripción general	Parcelario de rústica de los municipios de Corral de Almaguer, Lillo, El Romeral
	Descripción del conjunto de datos: Datos vectoriales con la representación territorial del parcelario rústico por municipio con líneas de polígono, parcelas y subparcelas (cultivos/ usos), vías de comunicación (ejes), ríos, arroyos, límites administrativos, puntos de control y otros datos.
	Extensión geográfica: 558.2 km ²
	Información vectorial con topología parcial y referencia espacial indirecta (referencia catastral).
	Conjunto de datos alfanuméricos relacionados: - Datos del inmueble: referencia catastral, superficie, valor catastral del suelo, valor catastral de la construcción, valor catastral del inmueble, titular, etc. (datos no disponibles) - Datos de la subparcela: superficie, cultivo , valor catastral, etc. - Datos del titular catastral: NIF, nombre... (datos no disponibles)
Formato	Shapefile
	Otros formatos: FICC (Formato de Intercambio de Cartografía Catastral), DXF. (Información en: www.catastro.minhac.es)
Origen	Datos temáticos
	Datos espaciales
	Linaje: A partir de un vuelo fotogramétrico 1:18.000 se obtienen ortofotografías a escala 1:5000 sobre las que se retinta la información catastral (parcelas subparcelas, etc.), digitalizando documentos gráficos existentes
	Precisión general: de 1 a 10 m
	Escala de uso: 1:5000
Estado	Sistema de Referencia: ED50, UTM, Huso 30
	Sistema de referencia espacial indirecto: Referencia catastral rústica, parajes
	Fecha de origen: 1990, dependiendo de la fecha del vuelo que se realiza por municipios.

Tabla 23. Tabla de metadatos del catastro de rústica (1).

Metadatos del catastro de rústica	
Definición y características de los datos	Objetos/atributos: Líneas de polígono: código de polígono, superficie. Líneas de parcela: código de parcela, superficie, código de calle/vía. Líneas de subparcela: código de subparcela, superficie, cultivo. Líneas de Hidrografía: código, nombre literal. Vías de comunicación: código, nombre literal. Líneas administrativas.
	La unidad mínima de información catastral es la parcela , identificada por su referencia catastral. Si una parcela se compone de subparcelas , se muestra una relación de los datos correspondientes a cada una.
Información sobre el distribuidor	Dirección General de Catastro (DGC)
	Trabajos de mantenimiento y actualización de los datos de carácter continuo
	Acceso a los datos: petición por escrito a la DGC

Tabla 24. Tabla de metadatos del catastro de rústica (2).

El conjunto de datos de esta fuente está compuesto por tres ficheros shapefile de tipo polígono, correspondientes al parcelario catastral de los municipios de Corral de Almaguer, Lillo y El Romeral. También se dispuso de un cuarto fichero con la distribución de los polígonos de pastos existentes en estos municipios en el año 2004. Este último fichero fue facilitado por D. Rafael Caballero, investigador del área de Agricultura del CSIC, y miembro del proyecto LACOPE (Landscape Development, Biodiversity and Cooperative Livestock Systems in Europe, Contrato EVK2-CT-2002-00150). Este proyecto estudia los componentes económicos y medioambientales a fin de promover la sostenibilidad de los sistemas ganaderos extensivos. Uno de los sistemas estudiados corresponde al de cereal-ovino en Castilla-La Mancha.

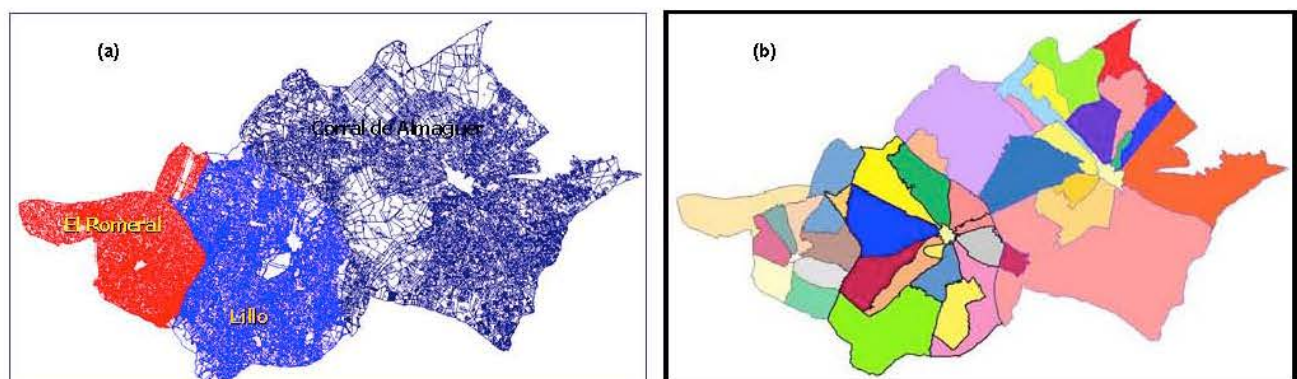


Figura 75. (a) Parcelario de rústica {fuente: DGC}. (b) Polígonos de pasto del área de estudio en el año 2004 {Fuente: proyecto LACOPE}.



Los datos espaciales del parcelario catastral de cada municipio llevan asociada una base de datos con la siguiente información:

EL ROMERAL		
<i>Campo</i>	<i>Tipo de dato</i>	<i>Descripción</i>
ID	AutoNumérico	Número único que identifica cada uno de los registros de la tabla (clave primaria)
MUNICIPIO	Número	Identificador numérico del municipio al que pertenece la parcela (subparcela)
PARCELA	Texto	Identificador numérico de la parcela. Único dentro del polígono catastral al que pertenece
POL_PAR_SUB	Texto	Secuencia de caracteres formada por la unión de: nº de polígono + nº de parcela + nº de subparcela
POLIGONO	Número	Identificador numérico del polígono catastral, único en el municipio al que pertenece
SUBPARCELA_T	Texto	Secuencia de caracteres que identifica de forma única cada subparcela dentro de la parcela a que pertenece
CULTIVOS	Texto	Descripción literal del uso de suelo o aprovechamiento de la subparcela en el catastro
DENOMINACI	Texto	Descripción literal más específica del uso de la subparcela recogido en el catastro
HECTAREAS	Número	Superficie en hectáreas de la subparcela

LILLO		
<i>Campo</i>	<i>Tipo de dato</i>	<i>Descripción</i>
ID	AutoNumérico	Número único que identifica cada uno de los registros de la tabla (clave primaria)
MUNICIPIO	Número	Identificador numérico del municipio al que pertenece la parcela (subparcela)
PARCELA	Texto	Identificador numérico de la parcela. Único dentro del polígono catastral al que pertenece
PARCELA_DE	Texto	Secuencia de caracteres formada por la unión de: 71452085000+Nº polígono+00+nºparcela+nºsubparcela
POLIGONO	Número	Identificador numérico del polígono catastral, único en el municipio al que pertenece
SUBPARCELA_T	Texto	Secuencia de caracteres que identifica de forma única cada subparcela dentro de la parcela a que pertenece
CULTIVOS	Texto	Descripción literal del uso de suelo o de la subparcela en el catastro
CULTIVOS	Texto	Secuencia alfanumérica con la descripción más detallada del uso de subparcela
HECTAREAS	Número	Superficie en hectáreas de la subparcela

CORRAL DE ALMAGUER		
<i>Campo</i>	<i>Tipo de dato</i>	<i>Descripción</i>
ID	AutoNumérico	Número único que identifica cada uno de los registros de la tabla (clave primaria)
MUNICIPIO	Número	Identificador numérico del municipio al que pertenece la parcela (subparcela)
PARCELA	Texto	Identificador numérico de la parcela. Único dentro del polígono catastral al que pertenece
POL_PAR_SUB	Texto	Secuencia de caracteres formada por la unión de: nº de polígono + nº de parcela + nº de subparcela
POLIGONO	Número	Identificador numérico del polígono catastral, único en el municipio al que pertenece
SUBPARCELA_T	Texto	Secuencia de caracteres que identifica de forma única cada subparcela dentro de la parcela a que pertenece
DENOMINACI	Texto	Descripción literal del uso de suelo o aprovechamiento de la subparcela en el catastro
HECTAREAS	Número	Superficie en hectáreas de la subparcela

Tabla 25. Estructura original de las tablas de datos asociadas al parcelario de los municipios del área de estudio.



Tras el proceso de carga y visualización de los datos anteriormente descritos, se observó que presentaban una serie de inconsistencias y anomalías geométricas que había que identificar y corregir mediante el uso de fuentes de datos complementarias. A fin de obtener una base de datos geográfica que representase adecuadamente la realidad de la zona de estudio, se utilizaron dos fuentes de datos auxiliares.

- b) **Fuente auxiliar nº 1: Proyecto SIGPAC.** La información utilizada consiste en una colección de ortofotos a escala 1:5000 y datos alfanuméricos de los usos o aprovechamientos de las parcelas de la zona de estudio.

El proyecto SIGPAC (<http://www.mapa.es/es/sig/pags/sigpac/intro.htm>), creado en el año 2005, es un sistema de información geográfica de identificación de parcelas agrícolas, propiedad del actual Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MARM)⁹. Este sistema permite identificar geográficamente las parcelas declaradas por los agricultores en cualquier régimen de ayudas relacionado con la superficie. Es una herramienta de obligada utilización en la gestión y control de las ayudas comunitarias - ayudas agrícolas de la Política Agraria Común (PAC), que utiliza el catastro como información básica. A partir de dicha información se registran los distintos recintos¹⁰ en los que pueden subdividirse las parcelas catastrales, especificando el uso de los mismos, con la finalidad de facilitar los procesos de solicitud, gestión y pago de las ayudas directas de la PAC.

El sistema consta de un mosaico de ortofotos digitales, que abarcan todo el territorio nacional, sobre las que, inicialmente, se superponen los planos parcelarios del catastro de rústica, de forma que para cada referencia concreta, el sistema proporciona automáticamente la imagen en pantalla de la parcela referenciada.

En definitiva, el SIGPAC consiste en una gran base de datos con información de las ortofotos y de los límites vectoriales de las parcelas y sus correspondientes recintos, entidades espaciales a las que se asocian un conjunto específico de atributos, tales como: códigos de provincia, municipio, polígono catastral, parcela y recinto, superficie total de la parcela, usos o aprovechamientos de sus recintos, superficie ocupada por cada uno de ellos, etc.

PROVINCIA	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	SUPERFICIE_HA	RECINTO	USO	SUPERFICIE	...

⁹ El proyecto es propiedad del MARM y está cofinanciado por las Consejerías de Agricultura de las distintas CCAA y por la Unión Europea. La empresa que lo ha desarrollado es Tragsatec. La labor de actualización del SIGPAC la realizan, conjuntamente, el MARM, a través del Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA), y las Comunidades Autónomas. En esta tarea también colaboran la Dirección General del Catastro del Ministerio de Economía y Hacienda y el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del Ministerio de Fomento.

¹⁰ Un recinto es una porción de terreno de una parcela que se dedica al cultivo de un determinado producto. Estas subdivisiones constituyen una estructura territorial artificial que puede experimentar continuos cambios en función de la política de ayudas y subvenciones agrarias.



El sistema se actualiza anualmente para facilitar a los agricultores cumplimentar sus solicitudes de ayuda, permitiéndoles localizar con facilidad todas sus parcelas a través de la información facilitada por el Visor SIGPAC. El acceso a este visor se realiza directamente a través de la dirección: <http://sigpac.mapa.es/fega/visor> e indirectamente a través de las páginas web del FEGA (<http://www.fega.es>) y del MARM (<http://www.marm.es>). Actualmente existe para uso público un servicio WMS¹¹ (Web Map Service) de SIGPAC: <http://195.235.91.59/wms/wms.aspx>.

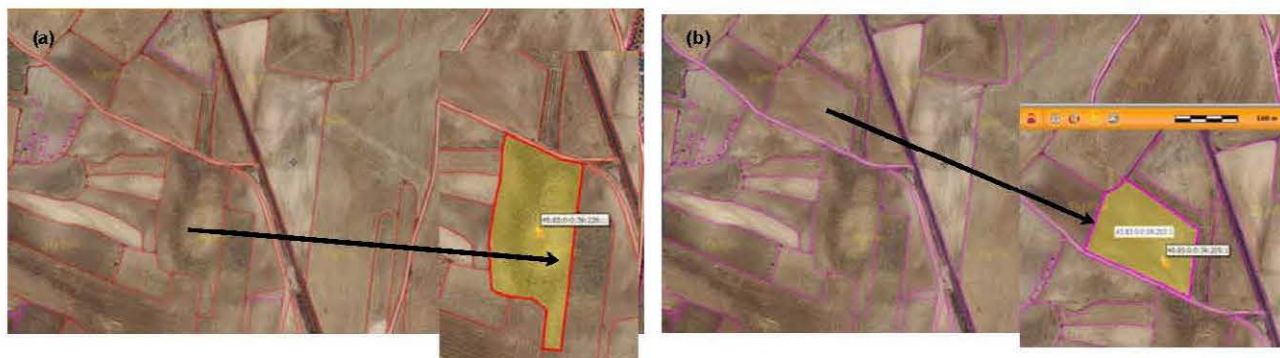


Figura 76. Información del Visor SIGPAC: Visualización de (a) parcelas y (b) recintos agrícolas con sus atributos.

La información de este trabajo está disponible en la URL: <http://sigpac.jccm.es/visorsigpac/>. Las *ortofotos* utilizadas corresponden a las hojas H631, H632, H658, H659, H660, H687 y H688 del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000. Los ficheros correspondientes a estas imágenes se han descargado en formato raster ECW, tienen un tamaño de 9306 filas por 14280 columnas, su sistema de referencia es ED-50 (Europeo-1950) y el sistema de proyección es UTM, Hemisferio Norte, Huso 30.

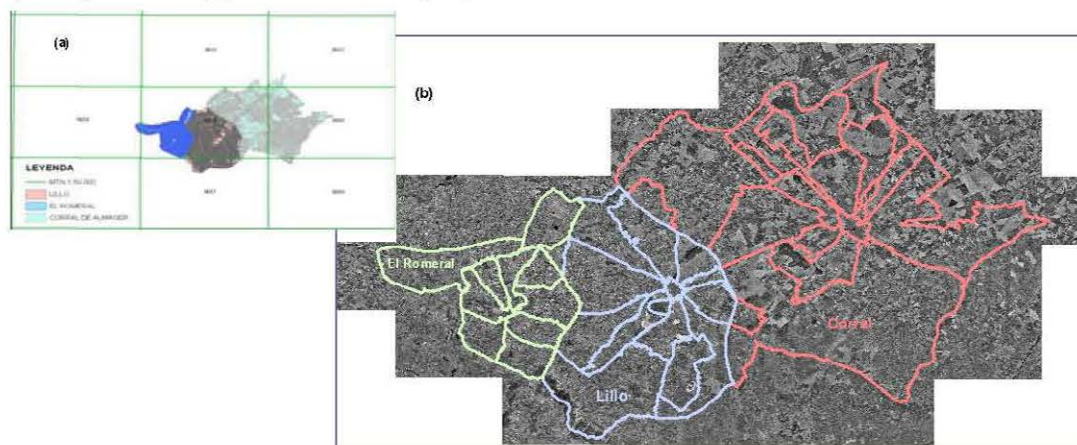


Figura 77. Distribución de las hojas del MTN (a) y de las ortofotos del SIGPAC (b) del área de estudio.

¹¹ WMS es un estándar para publicar cartografía en Internet y sus especificaciones están recogidas en OGC (Open Geospatial Consortium). Se trata de un servicio cartográfico y no se puede acceder a él desde un navegador convencional; se ha de utilizar desde un cliente WMS (visor GIS) que admita este tipo de conexión. El servicio WMS de SIGPAC proporciona 2 capas de información: Mapas Topográficos y Ortofotos, según la escala de visualización (similar al visor SIGPAC). Sus datos se pueden obtener en formato JPG o PNG.



Para completar la información necesaria para llevar a cabo la gestión agropecuaria de la zona de estudio, D. Rafael Caballero puso a disposición de este trabajo una **base de datos**, procedente del SIGPAC, con información de los usos agrícolas correspondientes a las parcelas y recintos registrados en el año **2005**. Los datos se estructuran en los campos que se muestran en la tabla siguiente:

Año	Grupo	Uso	Descripción Uso	PROVINCIA	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	SUPERFICIE_HA
2005	1	1	TRIGO BLANDO	45	54	1	48	3.43
2005	17	102	VIÑEDO VINIFICACIÓN	45	54	1	131	1.71
2005	2	20	BARBECHO TRADICIONAL	45	85	31	46	0.55
2005	16	5	CEBADA	45	85	2	31	0.8
2005	17	90	HORTALIZA (NO TOMATE)	45	85	41	360	1.41
2005	1	1	TRIGO BLANDO	45	150	13	111	0.52
2005	4	28	RETIR. OBLIG. NO FIJA	45	150	5	81	0.56
2005	17	101	OLIVAR	45	150	15	65	0.12

Tabla 26. Estructura original de la tabla de datos procedente del SIGPAC para los municipios del área de estudio.

Tal y como puede observarse en esta tabla, los códigos de identificación utilizados (provincia, municipio, polígono y parcela) sólo permiten diferenciar parcelas, de forma que los recintos de cada una de ellas se distinguen por tener un uso o aprovechamiento diferente y ocupar una determinada superficie.

Actualmente existe un Convenio de colaboración suscrito entre el FEGA y la Dirección General de Catastro, cuyo objetivo consiste en disponer de un parcelario común, de forma que tanto el SIGPAC como el Catastro compartan exactamente la misma información y que las actualizaciones se reflejen de forma coordinada en ambos sistemas, utilizando las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías.

En el momento de elaborar este proyecto de SIG, surgieron diferentes problemas a la hora de integrar la información del parcelario catastral con los datos del SIGPAC. Dado que la estructura de subparcelas no se correspondía con las subdivisiones en recintos agrícolas, los métodos para establecer una correspondencia entre los elementos de ambos conjuntos se reducían a la identificación visual sobre su representación gráfica, o bien, a la asociación temática entre atributos de contenido común, técnicas que suponían un trabajo laborioso que quedaba fuera de los objetivos de esta tesis. Por este motivo, se optó por prescindir de estos elementos y utilizar la parcela como unidad básica de información en el proyecto.



- c) **Fuente auxiliar nº 2:** La información temática de la **oficina virtual del catastro**, disponible en la página web <https://ovc.catastro.meh.es/>, así como la información espacial de su servicio WMS (<http://ovc.catastro.meh.es/Cartografia/WMS/ServidorWMS.aspx>).



Figura 78. Fuente de datos auxiliar nº 2: Oficina Virtual del Catastro.

A partir de todas las fuentes citadas anteriormente, se procedió a la carga directa de datos en el programa ArcGIS v. 9.2 y en GeoMedia Professional v.6.1.

Tras la fase de recopilación y evaluación de datos existentes, hay que proceder a la entrada de datos en el sistema, utilizando los métodos de carga adecuados al tipo y formato de éstos. Los procesos de carga irán desde la entrada directa o copia de datos en el equipo hasta la digitalización, en pantalla o en tablero, incluyendo los procesos de transformación de datos que sean necesarios.



4.2.3 Integración y edición geométrica de datos

Una vez finalizadas las fases anteriormente descritas, se realiza el proceso de integración, es decir, la fusión y homogenización de los diferentes conjuntos de datos del proyecto. La fase de homogeneización tiene por objeto unificar los siguientes parámetros:

- sistema de referencia (datum y sistema de proyección);
- precisión;
- estado de actualización y puesta al día.

En este trabajo no ha sido necesario realizar ninguna transformación para unificar los datos del proyecto.

A la hora de fusionar varios conjuntos de datos, también hay que tener en cuenta las incoherencias geométricas que puedan producirse en la representación de las entidades geográficas, detectarlas y corregirlas.

En la literatura anglosajona se utiliza la palabra ‘conflation’ para referirse no sólo al “procedimiento o método para hacer coincidir las representaciones espaciales (posiciones), que puedan existir en diferentes conjuntos de datos, de una misma entidad o de entidades correspondientes”¹², sino también a otros muchos, algunos de los cuales se consideran englobados en la edición geométrica.

Dado que en castellano no existe un término técnico equivalente al inglés, en este texto se utilizará el vocablo ‘armonización’ (García Lázaro 2001)¹³ para referirse a las tareas de fusionar y ajustar –modificar, corregir- los conjuntos de datos que integran un proyecto SIG, de modo que la representación de cada entidad geográfica sea única” (Moreno Regidor 2003)¹⁴.

La fusión de los conjuntos de datos relacionados espacialmente puede realizarse de dos formas, según la distribución geográfica de la información que contengan:

- En vertical, por unión de zonas de trabajo que se superponen –total o parcialmente- en el espacio (armonización vertical).
- En horizontal, por unión de zonas de trabajo adyacentes (armonización horizontal).

¹² "The procedure of reconciling the positions of corresponding features in ... data layers". Aronoff, Stanley (1989). *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canada.

¹³ García Lázaro, F. J. (2001). *Sistemas de Información Geográfica*. Transparencias adaptadas al programa de la asignatura de SIG de la E. U. I. T. Topográfica.

¹⁴ Moreno Regidor, P. (2003). *Fundamentos de Sistemas de Información Geográfica*. Transparencias adaptadas al programa de la asignatura de SIG la E. T. S. I. en Topografía, Geodesia y Cartografía.

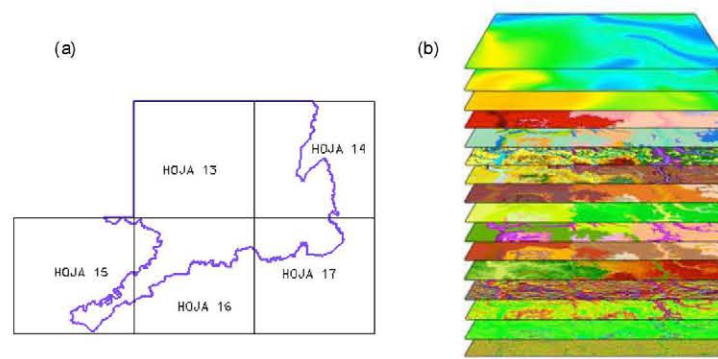


Figura 79. Fusión de conjuntos de datos en procesos de Armonización Horizontal (a) y Vertical (b).

La armonización también implica la detección y corrección de errores por la falta de coincidencia analítica en la representación gráfica de objetos homólogos, objetos que pueden corresponder a una misma entidad geográfica o a diversas entidades que deberían superponerse en la misma posición.

Los parcelarios catastrales de los municipios del área de estudio constituyen tres fuentes de datos diferentes, con un formato, sistema de referencia y precisión homogéneos. La integración de estos conjuntos de datos se ha reducido a un proceso de armonización horizontal, en el que ha sido necesario identificar los objetos homólogos (parcelas) en las respectivas zonas de case entre ficheros y corregir los errores detectados.

En la identificación de parcelas homólogas hay que diferenciar entre el proceso de armonización geométrica -o espacial-, descrito anteriormente, y el de semántica, cuyo objetivo es comparar los modelos y/o las clasificaciones temáticas utilizadas en cada conjunto de datos, para identificar las correspondencias existentes y homogeneizar dichas estructuras cuando sea necesario.

En primer lugar se describirán los errores detectados en el proceso de armonización geométrica horizontal de los ficheros de datos. Estos errores pueden clasificarse básicamente en dos tipos: huecos y solapes entre las parcelas de municipios adyacentes del área de estudio.

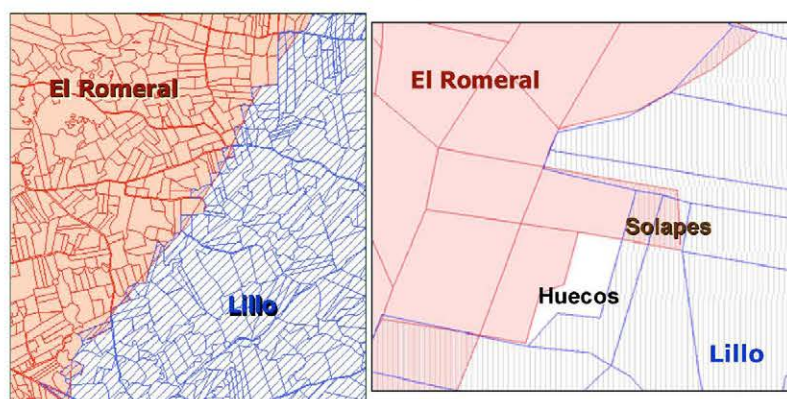


Figura 80. Ejemplo de huecos y solapes entre parcelas de municipios adyacentes.

Para solucionar estas anomalías, y las detectadas posteriormente en el proceso de edición geométrica, se han utilizado diversas herramientas de los programas ArcGis 9.2 y GeoMedia v.6.1, entre ellas las de edición manual, de topología y las de chequeo y reparación automática de la geometría.



A continuación se describen, en la misma secuencia, los procesos realizados en las fases de: armonización espacial horizontal, edición geométrica y armonización semántica.

- Detección y corrección de solapes entre los municipios del área de estudio.

En los datos del catastro de rústica, algunos de los límites de las parcelas de un municipio no coinciden geográficamente con los límites de las parcelas del municipio colindante. Este hecho genera errores de solape o superposición entre las parcelas de los municipios adyacentes de la zona de estudio.

Desde el punto de vista catastral, una parcela es una unidad indivisible, por lo que si su geometría se extiende por dos municipios, sólo puede considerarse perteneciente a uno de ellos, aquel donde tiene la mayor parte de su superficie. Estas parcelas pueden resultar “problemáticas” en el caso de las líneas límite entre parcelarios de municipios adyacentes. En estos casos, la geometría de estas parcelas, en el municipio al que catastralmente pertenecen, no se ajusta a la definición del límite municipal sino que se superpone a éste. En el parcelario del otro municipio se ha creado una parcela ficticia a fin de completar su extensión territorial. Aunque estas dos parcelas deberían superponerse espacialmente, por lo general, su definición geométrica en ambos parcelarios no coincide y dificulta la determinación del límite correcto.

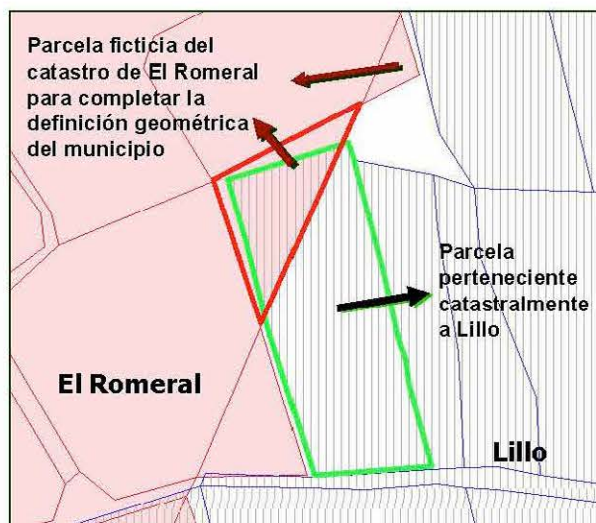


Figura 81. Ejemplo de solapes entre parcelas de dos municipios.

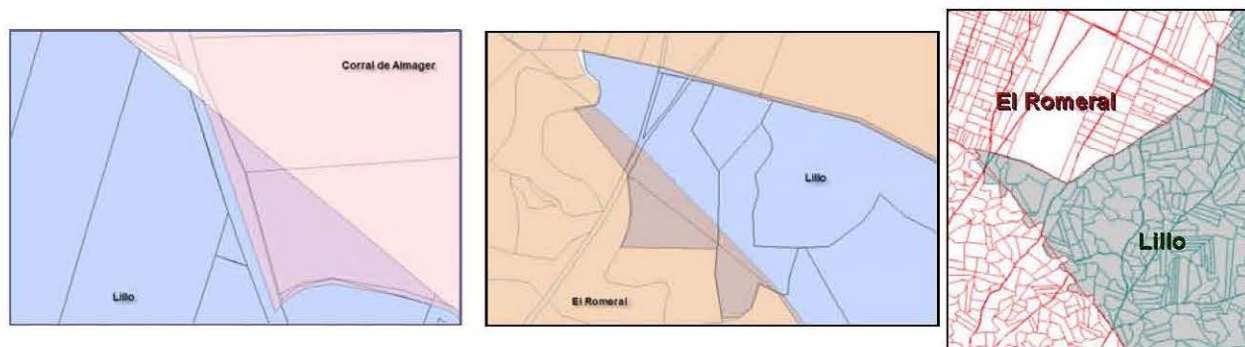


Figura 82. Ejemplos de superposición entre parcelas colindantes de diferentes municipios.

A la vista de los errores detectados, se decidió comprobar la geometría correspondiente al parcelario y a los límites municipales con otras fuentes de información. Para ello se utilizaron los datos oficiales que están disponibles en la Oficina Virtual de Catastro (O.V.C.). En el proceso de revisión y chequeo de los elementos superpuestos se detectaron las siguientes anomalías:

- ✓ Parcelas que sólo tienen asociados datos del uso del suelo en uno de los dos municipios a los que supuestamente pertenecen. Si se asume que la parcela pertenece al municipio A, su geometría se modificará de manera que sus límites coincidan con los del municipio B, siendo eliminada de éste último. En el ejemplo siguiente, las parcelas cuyas geometrías pertenecen a El Romeral y se superponen con parcelas de Lillo, han sido eliminadas automáticamente del primero ya que no tiene datos asociados en dicho municipio.

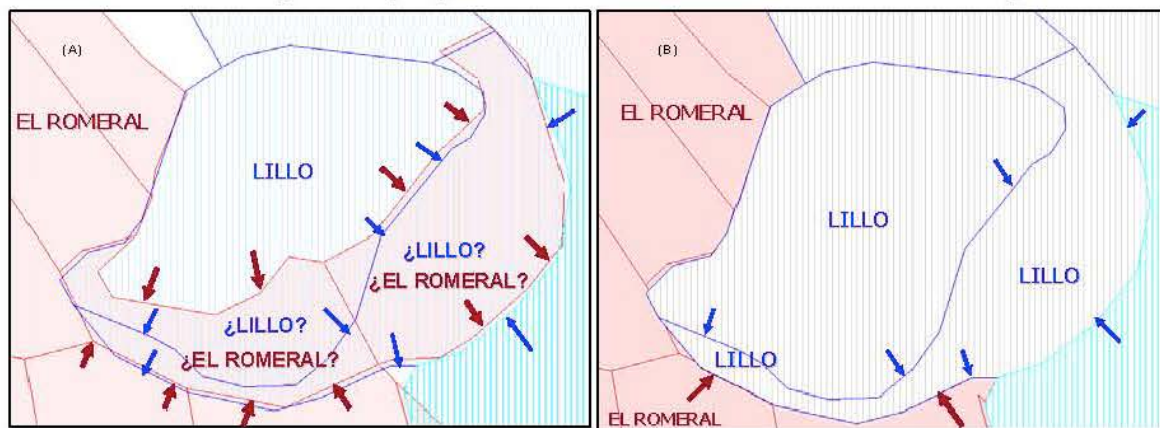


Figura 83. (A) Ejemplo de parcelas superpuestas en los municipios de El Romeral y Lillo. (B) Resultado de la edición automática al eliminar las parcelas sin datos en uno de los municipios.

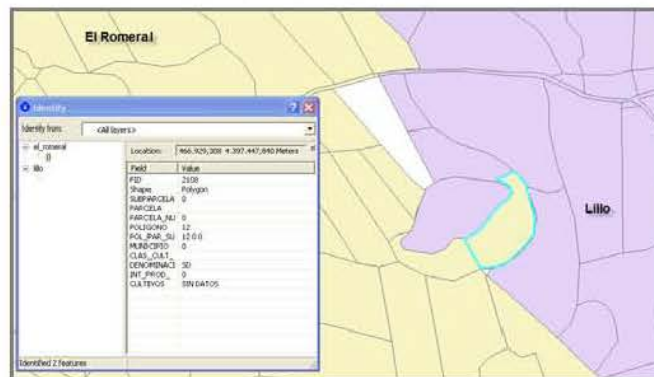


Figura 84. Resultado de la edición de la figura anterior, visualizando los atributos asociados a la parcela no eliminada.

- ✓ Parcelas que tienen asociados datos diferentes del uso del suelo en los dos municipios a que pertenecen. En este caso no se dispone de criterios para asignar la parcela a uno de los municipios, por lo que se adoptará una solución de compromiso basada en razones de “conveniencia geométrica”. Se analizan las geometrías de las parcelas superpuestas y se suprime una de ellas, generalmente la de menor superficie. La parcela de Lillo, cuyos límites aparecen resaltados en la siguiente figura, se superpone con otras dos de menor dimensión de El Romeral, razón por la cual han sido eliminadas de este último municipio.

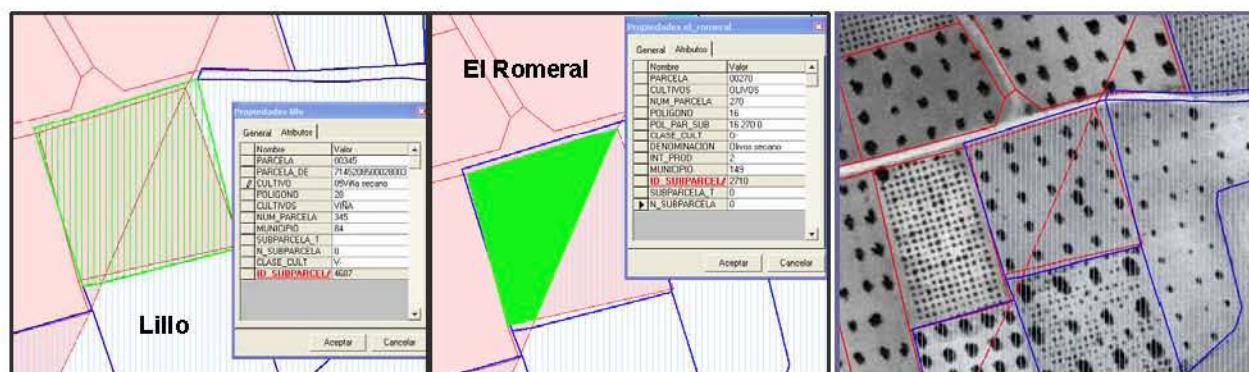


Figura 85. Ejemplo de parcelas superpuestas con diferentes datos asociados en dos municipios. Comprobación de sus geometrías sobre ortofoto de la zona.

- ✓ Parcelas que carecen de datos del uso del suelo en los dos municipios a que pertenecen. Al igual que en el caso anterior, la solución adoptada también se basa en razones o criterios de “conveniencia geométrica”.

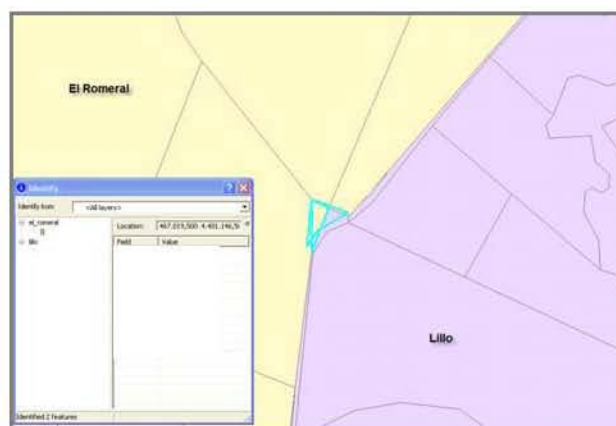


Figura 86. Ejemplo de parcelas superpuestas en dos municipios sin datos asociados en ninguno de ellos.

Los métodos de corrección empleados tienen por único objetivo la obtención de un conjunto de datos coherente y adecuado a las necesidades de este proyecto. Hay que destacar que la mayoría de los errores detectados en esta fase tienen su origen en la gestión del parcelario de rústica a cargo de la Dirección General del Catastro. Esta gestión se ha realizado, hasta el momento, municipio por municipio, sin que se haya comprobado la “coherencia intermunicipal” de los datos.

- Detección y corrección de huecos entre los municipios del área de estudio.

Otro problema que se presenta en la zona de case entre dos o más municipios, es la existencia de “huecos o agujeros”, es decir, zonas del terreno que no pertenecen a ningún municipio en concreto. En un recubrimiento exclusivo y excluyente de toda la zona de estudio no pueden existir este tipo de inconsistencias o anomalías geométricas.

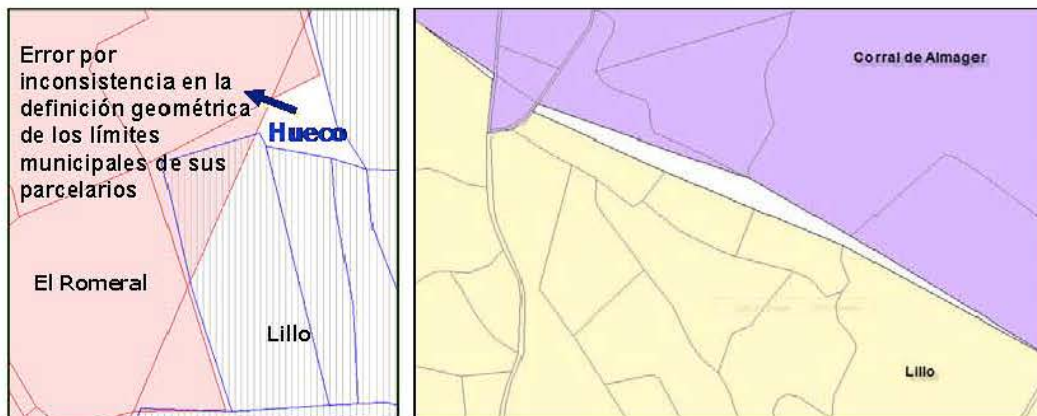


Figura 87. Ejemplo de huecos (polígonos en color blanco) entre dos municipios.

Dado que el propósito de esta tesis no es la edición de la cartografía catastral, los errores detectados en esta fase se han corregido de forma coherente, utilizando criterios meramente geométricos tanto en la asignación de los polígonos o parcelas-hueco a los municipios afectados, como en la corrección de geometrías superpuestas. Se ha optado por esta solución ante el desconocimiento del dato real y la dificultad de obtener esta información, ya sea del organismo que distribuye los datos o a través de otras fuentes.

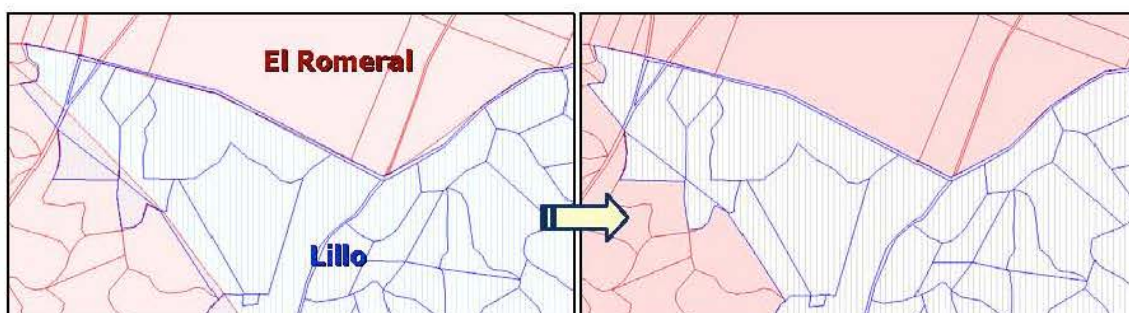


Figura 88. Detección y corrección de huecos y solapes entre dos municipios.

- Edición geométrica.

Tras finalizar los procesos anteriores, se procedió a realizar una edición geométrica de los datos a fin de garantizar una representación coherente y correctamente individualizada de todas y cada una de las entidades que forman parte del proyecto. En esta fase se detectaron algunos errores, tales como: inconsistencias geométricas en las zonas de case entre municipios - anomalías diferentes a las corregidas anteriormente-, huecos interiores entre parcelas de un municipio, existencia de geometrías duplicadas y de polígonos ficticios (slivers) residuales, generados tras aplicar herramientas de edición automática en la armonización.



Para la detección de errores se recurrió al uso de herramientas específicas de edición y de topología, así como a la revisión y comprobación visual, utilizando como apoyo las ortofotos del SIGPAC de la zona a verificar. A continuación se describen los procesos realizados en esta fase.

El parcelario de rústica de un municipio ha de formar un recubrimiento exclusivo y excluyente, por lo que no pueden existir “huecos” en su interior, es decir, puntos del terreno que no pertenezcan a ninguna de las parcela del municipio.

En esta fase se han localizado errores en los municipios de Lillo y de El Romeral. Una vez detectados los polígonos correspondientes a los huecos interiores, se modifica su geometría, agregando dichos polígonos a la parcela adyacente con la que comparten el borde de mayor longitud. Con este proceso se consigue ajustar cada uno de los parcelarios municipales a las características del recubrimiento citado.

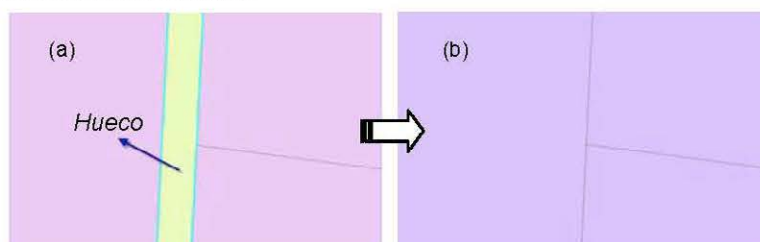


Figura 89. (a) Ejemplo de huecos interiores en el parcelario catastral. (b) Resultado de la edición geométrica.

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de los restantes tipos de error citados: edición de parcelas intermunicipales y eliminación de geometrías duplicadas y polígonos ficticios.

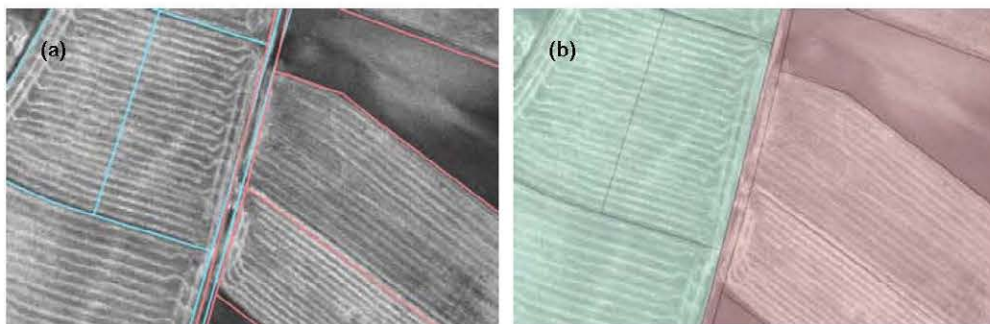


Figura 90. (a) Parcelas antes de la edición. (b) Parcelas después de la edición



Figura 91. (a) Ejemplo de parcelas duplicadas. (b) Ejemplo de polígonos ficticios generados en procesos de edición automática de otros errores.



- Armonización semántica.

El objetivo de este proceso es comparar los modelos y/o las clasificaciones temáticas utilizadas en las fuentes de datos a integrar, para localizar las correspondencias existentes y poder realizar las siguientes operaciones:

- homogeneizar, cuando sea necesario, las estructuras de datos de los diferentes modelos;
- detectar y corregir los errores de identificación de objetos homólogos, por tener asociados diferentes valores de atributos en cada conjunto de datos.

Al comparar la estructura de datos de los tres parcelarios catastrales del área de estudio, se observan algunas diferencias, tales como: variación en el número total de campos definidos y discrepancias en los nombres y tipos de datos asignados a los atributos.

EL ROMERAL		LILLO		CORRAL DE ALMAGUER	
<i>Campo</i>	<i>Tipo de dato</i>	<i>Campo</i>	<i>Tipo de dato</i>	<i>Campo</i>	<i>Tipo de dato</i>
ID	Autonumérico	ID	Autonumérico	ID	Autonumérico
MUNICIPIO	Número	MUNICIPIO	Número	MUNICIPIO	Número
PARCELA	Texto	PARCELA	Texto	PARCELA	Texto
POL_PAR_SUB	Texto	PARCELA_DE	Texto	POL_PAR_SUB	Texto
POLIGONO	Número	POLIGONO	Número	POLIGONO	Número
SUBPARCELA_T	Texto	SUBPARCELA_T	Texto	SUBPARCELA_T	Texto
CULTIVOS	Texto	CULTIVO	Texto	DENOMINACI	Texto
DENOMINACI	Texto	CULTIVOS	Texto	HECTAREAS	Número
HECTAREAS	Número	HECTAREAS	Número		

Tabla 27. Estructura de las tablas de datos asociadas a los parcelarios de los municipios del área de estudio.

También se detectan ciertas diferencias cuando se comparan los datos asociados a las unidades de los tres parcelarios. Las mayores discrepancias aparecen en los valores utilizados en cada municipio para designar a las subparcelas y describir el uso del suelo a que se destina.

EL ROMERAL								
ID	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	POL_PAR_SUB	SUBPARCELA_T	CULTIVOS	DENOMINACI	HECTAREAS
2	150	22	214	22 214 0	0	ÁRBOLES DE RIBERA	Árboles de ribera	2.34
7	150	15	66	15 66 b	b	FRUTALES	Frutales secano	5.72
8	150	1		1 9002 0	0	IMPRODUCTIVO	Improductivo	0.49

LILLO								
ID	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	PARCELA_DE	SUBPARCELA_T	CULTIVO	CULTIVOS	HECTAREAS
6	85	26	238	71452085000260023		03Viña secano	VIÑA	1.56
7	85	26	84	71452085000260008	000A	02Olivos secano	OLIVOS	3.60
9	85	26	213	71452085000260021	000B	02Labor o Labradío secano	TIERRAS DE LABOR	0.97

CORRAL DE ALMAGUER							
ID	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	POL_PAR_SUB	SUBPARCELA_T	DENOMINACI	HECTAREAS
11	0	51	175	51 175 y	y	SD	2.33
12	54	51	175	51 175 w	w	Improductivo	1.05
23	54	1	64	1 64 r	r	Labor o Labradío secano	1.74
102	54	85	9006	85 9006		Improductivo	0.65
110	54	-1	0	-1 9001		Improductivo	

Tabla 28. Datos de las tablas asociadas al parcelario de los municipios del área de estudio.



La clasificación de una parcela, es decir, el uso del suelo o aprovechamiento a que se dedica, es un atributo que se registra en el Catastro. Si una parcela no presenta características homogéneas respecto al aprovechamiento, se divide en subparcelas que ofrezcan uniformidad en el mismo y en su intensidad productiva. Los valores del campo o campos, correspondientes al atributo uso de suelo que aparecen en las tablas de los tres municipios, son los siguientes:

EL ROMERAL		LILLO		CORRAL DE ALMAGUER
CULTIVOS	DENOMINACI	CULTIVO	CULTIVOS	DENOMINACI
ÁRBOLES DE RIBERA	Árboles de ribera	00Huerta regadio	HUERTA REGADIO	Encinar
FRUTALES	Frutales seco	00Improductivo	IMPRODUCTIVO	Frutales seco
IMPRODUCTIVO	Improductivo	00Monte bajo	MONTE BAJO	Hidrografía natural
OLIVOS	Labor o Labradío regadio	00Pastos	OLIVOS	Huerta regadio
PASTOS	Labor o Labradío seco	00Pinar maderable	PASTOS	Improductivo
PINAR MADERABLE	Labor-Olivos seco	01Labor o labradío regadio	PINAR MADERABLE	Labor o labradío con encinas seco
SIN DATOS	Labor-Viña seco	01Labor o Labradío seco	SIN DATOS	Labor o Labradío regadio
TIERRAS DE LABOR	Olivos seco	01Olivos seco	TIERRAS DE LABOR	Labor o Labradío seco
TIERRAS DE LABOR-OLIVO	Pastos	01Viña olivar seco	TIERRAS DE LABOR	Labor-Olivos seco
TIERRAS DE LABOR-VIÑA	Pinar maderable	01Viña seco	VIAS	Labor-Viña seco
VIÑA	Viña olivar seco	02Labor o labradío regadio	VIÑA	Monte bajo
VIÑA-OLIVAR	Viña seco	02Labor o Labradío seco	VIÑA-OLIVAR	Olivos seco
	SD	02Olivos seco		Pastos
		02Viña olivar seco		Pinar maderable
		02Viña seco		Prados o praderas
		03Labor o Labradío seco		SD
		03Olivos seco		Viña olivar seco
		03Viña olivar seco		Viña seco
		03Viña seco		
		04Labor o Labradío seco		
		04Viña seco		
		05Labor o Labradío seco		
		05Viña seco		
		05Viña seco		
		06Labor o Labradío seco		
		06Viña seco		
		SIN DATOS		
		VIAS		

Tabla 29. Valores de los usos del suelo asociados al parcelario catastral de los municipios del área de estudio.

Para homogeneizar la estructura de datos y el dominio de valores correspondiente al atributo del aprovechamiento catastral, se sustituyeron los campos originales por otro con un identificador alfanumérico del uso del suelo asociado a la subparcela, y se diseñó una tabla específica de usos con la descripción e identificador correspondiente a cada tipo.

Los valores de aprovechamiento correspondientes a vías, hidrografía natural, hidrografía construida, zona urbana o diseminado urbano y sin denominación (SD), designan subparcelas de descuento, es decir, recintos que afectan a bienes inmuebles, que no son de naturaleza rústica, y representan superficies no imponibles.



Id_uso	Descripción del tipo de uso de suelo	Tipo de uso	Clase
1	Viña secano	Viña	V-
2	Viña olivar secano	Viña-olivar	VO
3	Olivos secano	Olivos	O-
4	Huerta regadío	Huerta regadío	HR
5	Labor o labradío regadío	Tierras de labor	CR
6	Labor o labradío secano	Tierras de labor	C-
7	Labor – olivos secano	Labor olivar	CO
8	Labor – viña secano	Labor viña	CV
9	Labor o labradío con encinas secano	Labor encinar	CE
10	Frutales secano	Frutales	F-
11	Pastos	Pastos	E-
12	Prados o praderas	Prados	PD
13	Encinar	Encinar	FE
14	Árboles de ribera	Árboles de ribera	RI
15	Pinar maderable	Pinar maderable	MM
16	Monte Bajo	Monte Bajo	MB
20	Improductivo	Improductivo	I-
110	Vías	VÍAS	VT
120	Hidrografía natural	HidroN	HG
130	Zona urbana y diseminado urbano	URB	U-
200	Sin denominación (SD)	SIN DATOS	SD

Tabla 30. Tabla normalizada de valores de tipos de usos catastrales en el área de estudio.

Para identificar las subparcelas en que se divide cada parcela, en el catastro de rústica de los municipios del área de estudio, se usa una nomenclatura obtenida por la unión de los valores correspondientes a: [identificador de municipio], identificador de polígono catastral, identificador de parcela e identificador de subparcela. Según la Dirección General del Catastro, si una parcela se divide en varias subparcelas, a éstas se les puede asignar cualquier secuencia formada por 1 ó 2 caracteres alfabéticos en minúscula: a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, p, q, r, s, t, u, v, c, w, z [no se usan: ñ, o, y]. Cuando la parcela no está subdividida, en el registro catastral se asigna un cero al campo correspondiente a la subparcela, no usando ninguno de los caracteres alfabéticos.

Tal y como se observa en las tablas anteriores, los valores del campo correspondiente al **identificador de subparcela** han sido asignados con criterios diferentes en los tres municipios:



- Si una parcela no está dividida, el campo de subparcela puede contener el valor “cero” o el valor “NULL”.
- Si una parcela está dividida en varias unidades, los valores asignados a las subparcelas pueden estar formados por secuencias de caracteres alfabéticos en minúscula o bien por secuencias del tipo “000A..., 000M...,”.

Para homogeneizar los valores del campo subparcela, se procedió a sustituir los caracteres usados por un identificador numérico aplicando el siguiente criterio:

- 0: si el campo es nulo o contiene un 0.
- 1: si el campo contiene la letra A o a.
- 2: si el campo contiene la letra B o b.
-
- 23: si el campo contiene la letra Z o z.

Por último, para la integración semántica de los parcelarios catastrales del área de estudio hubo que modificar la estructura de datos de cada uno de ellos, eliminando, añadiendo o modificando los campos que fueron necesarios, tal y como se comentó al inicio de esta sección. Al finalizar este proceso, se obtuvo la siguiente estructura de tablas en los tres municipios:

EL ROMERAL							
ID	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	SUBPARCELA	CULTIVOS	CLASE	HECTAREAS
2	150	22	214	0	ARBOLES DE	RI	2.34
7	150	15	66	2	FRUTALES	F-	5.72
8	150	1	9002	0	IMPRODUCTIVO	I-	0.49

LILLO							
ID	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	SUBPARCELA	CULTIVOS	CLASE	HECTAREAS
6	85	26	238	0	TIERRAS DE	C-	1.56
7	85	26	84	1	OLIVOS	O-	3.60
9	85	26	213	2	TIERRAS DE	C-	0.97

CORRAL DE ALMAGUER							
ID	MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	SUBPARCELA	CULTIVOS	CLASE	HECTAREAS
11	54	51	175	23	SIN DATOS	SD	2.33
12	54	51	175	22	SIN DATOS	SD	1.05
23	54	51	64	21	IMPRODUCTIVO	I-	1.74
102	54	85	9006	0	TIERRAS DE	C-	0.65
110	54	1	9001	0	IMPRODUCTIVO	I-	0.91

Tabla 31. Estructura de tablas del parcelario del área de estudio tras el proceso de armonización semántica.



4.2.4 Edición temática de datos

La edición temática tiene por finalidad la representación fidedigna de las entidades, de modo que exista concordancia entre la realidad y los atributos almacenados en la base de datos. Este proceso consiste en la localización y corrección de los errores existentes en la identificación y caracterización de entidades (Moreno 2003)¹⁵. Las causas de este tipo de errores, pueden tener su origen en factores del tipo:

- Errores humanos, ya sea en la interpretación de la realidad geográfica o en la asignación de valores correspondientes a propiedades de las entidades.
- Uso de criterios diferentes en la elaboración de modelos de datos. Por ejemplo, los diversos organismos oficiales que publican cartografía temática de un cierto tipo (edafología, geología, etc.), pueden utilizar diferentes clasificaciones estándar o incluso sus propias clasificaciones, lo que da lugar a modelos cartográficos no homogéneos.

En la fase de edición temática de este proyecto, se han realizado dos procesos:

- Detección y corrección de errores en la identificación y caracterización de las unidades catastrales.
- Actualización del uso de suelo catastral por el uso de suelo agrícola. Esta información procede del SIGPAC y refleja con mayor fidelidad el aprovechamiento de las unidades catastrales en el año 2005, fecha correspondiente al parcelario de rústica (fuente principal de datos del proyecto).

- Errores en la caracterización de las unidades catastrales.

Una vez realizadas las fases de integración y edición geométrica, se detectaron una serie de anomalías en los datos asociados a la representación gráfica de las unidades catastrales. En primer lugar, se localizó un conjunto de subparcelas con una caracterización que puede calificarse de incompleta, por carecer de algún dato significativo, o bien de singular, por tener asociados valores anómalos. Como ejemplo del primer tipo de errores, en la tabla siguiente se indica el número de registros carentes de valor en el atributo correspondiente al uso catastral.

MUNICIPIO	Nº SUBPARCELAS	Nº SUBPA CELAS SIN DATOS DE USO CATASTRAL
Corral de Almaguer	13862	145
Lillo	11813	0
El Romeral	9723	423

Tabla 32. Número total de unidades catastrales (subparcelas) y de unidades sin dato de uso del suelo.

¹⁵ Moreno Regidor, P. (2003). *Fundamentos de Sistemas de Información Geográfica*. Transparencias adaptadas al programa de la asignatura de SIG la E. T. S. I. en Topografía, Geodesia y Cartografía.



Con relación al segundo tipo de errores, se identificaron una serie de unidades con datos anómalos, es decir, no incluidos en el dominio de valores correspondiente a su campo, o bien sin valor en alguno de los atributos que forman la secuencia de identificación de las subparcelas (código municipio + código polígono + código parcela + código subparcela). A continuación se presenta un ejemplo de algunos de estos casos:

Municipio	Polígono	Parcela	Subparcela	Uso de suelo	Ejemplos gráficos
85	6		5	SIN DATOS	
85	27	0		SIN DATOS	
85	16	0	0	SIN DATOS	
54	-1	0		Improductivo	
0	1	0	1	Monte Bajo	
54	45	0	0	SIN DATOS	
54	9	9002	0	Improductivo	
54	36	0	0	SIN DATOS	

Tabla 33. Ejemplo de unidades catastrales (subparcelas) con datos anómalos.

Tras seleccionar y visualizar gráficamente estas unidades, se utilizaron las fuentes de datos auxiliares (ortofotos del SIGPAC y datos de la Oficina Virtual del Catastro) para corroborar la anomalía y realizar las modificaciones oportunas. En los casos indicados anteriormente se realizaron estos cambios:

Municipio	Polígono	Parcela	Subparcela	Cultivos
85	6	9100	0	VIAS
85	27	106	0	SIN DATOS
85	16	104	0	SIN DATOS
85	40	9001	0	ZONA URBANA
54	1	62	1	Monte Bajo
54	9	9002	0	VIAS

Tabla 34. Resultado de la edición realizada en unidades catastrales con datos anómalos.



En general, las unidades anómalas correspondían a subparcelas de descuento¹⁶, es decir, superficies no imponibles del tipo: vías, hidrografía, zona urbana o suelo improductivo. El mayor número de errores de identificación lo presentan las unidades correspondientes a vías o caminos, ya que su caracterización no era homogénea. Este tipo de unidades deberían identificarse por un número de parcela superior a 9000, $np \geq 9000$, típico de superficies de descuento, un número de subparcela con valor cero, $ns = 0$, y un código de uso catastral correspondiente a “Vía”. Sin embargo, se ha encontrado una elevada proporción de caminos que tienen asociado un uso diferente al suyo, generalmente el tipo “improductivo” o “sin datos”. También hay que destacar que la secuencia “9xxx¹⁷, 0, improductivo” aparece en otras unidades que no son caminos, tal y como se muestra en la imagen derecha (b) de la siguiente figura.

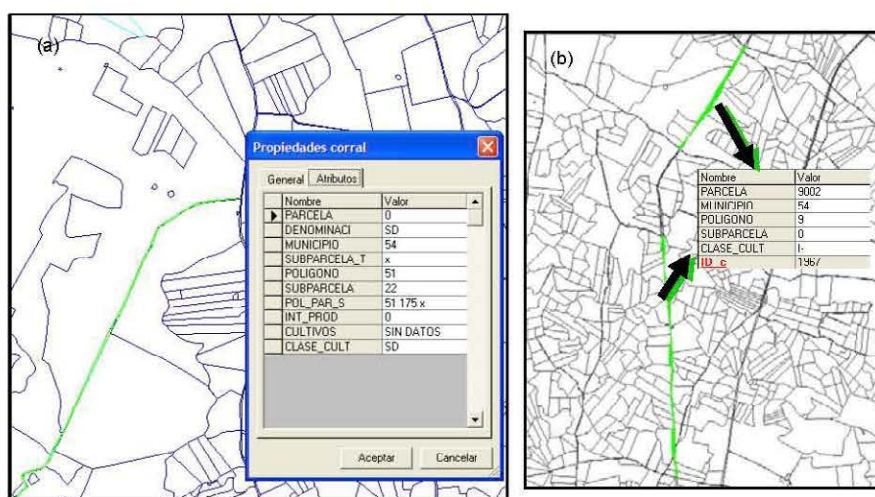


Figura 92. Caracterización de unidades del tipo vía con otro valor de uso catastral: (a) “Sin Datos”, (b) “Improductivo”.

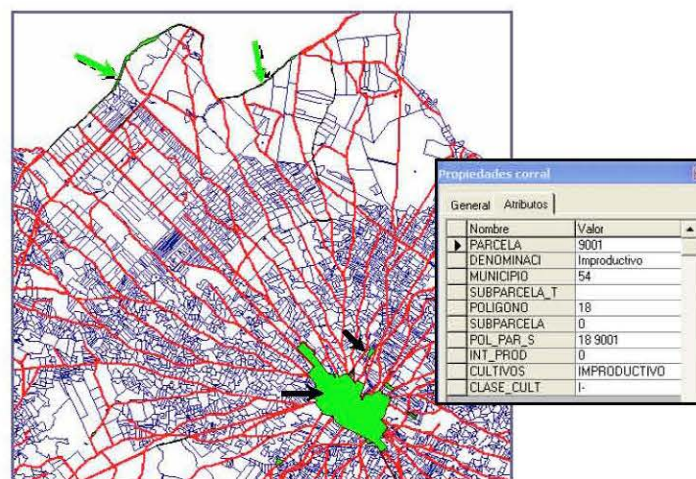


Figura 93. Unidades catastrales diferentes (zona urbana, parcela agrícola y vías) caracterizadas como parcelas de descuento de uso improductivo.

¹⁶ En Catastro, a las parcelas correspondientes a superficies no imponibles se les asigna un número a partir del valor 9000, $np \geq 9000$.

¹⁷ La secuencia “9xxx” indica cualquier número de cuatro cifras comprendido en el rango: 9000 ... 9999



Existen otros casos donde dos geometrías diferentes comparten los mismos valores de identificación, excepto el correspondiente a su superficie. Esta situación suele darse en aquellas unidades subdivididas artificialmente por una vía o camino, o bien puede tener su origen en un error de asignación de valores iguales a unidades catastrales diferentes.



Figura 94. Uso de los mismos valores de identificación. Caso (a): Una misma unidad catastral, dividida por un camino, ha generado dos geometrías. Caso (b): Error en la identificación de dos unidades completamente diferentes.

La corrección de las anomalías en la identificación y caracterización de las unidades catastrales ha supuesto un trabajo muy laborioso, dado el elevado número de casos encontrados y la diferente tipología de los errores, de los que únicamente se han descrito los más comunes.



- Actualización del uso de suelo registrado en catastro por el aprovechamiento agrícola.

Para la adecuada gestión de los sistemas extensivos del tipo cereal-ovino se precisaría analizar los usos actuales del suelo agrícola como fuente de recursos pastorales y forrajeros, dato imprescindible para calcular la superficie forrajera equivalente de cada unidad (parcela). De las fuentes de información utilizadas en este proyecto, la base de datos de cultivos del SIGPAC es la más fidedigna y representa con mayor fiabilidad los usos agrícolas correspondientes a un determinado año, ya que la puesta al día de sus datos es prácticamente continua frente al largo periodo de actualización de los datos catastrales. A continuación se muestra, para los municipios del área de estudio, una relación de los usos del año 2005 registrados en el SIGPAC frente a los que figuran en el Catastro¹⁸ de ese mismo año.

USO CATASTRAL	Corral	Lillo	El Romeral
Viña secano	x	x	
Viña olivar secano	x	x	x
Olivos secano	x	x	x
Huerta regadío	x	x	
Labor o labradío regadío	x		*
Labor o labradío secano	x	x	x
Labor – olivos secano	x		x
Labor – viña secano	x		x
Labor con encinas secano	x		
Frutales secano	x		x
Pastos	x	x	x
Prados o praderas	x		
Encinar	x		
Árboles de ribera			x
Pinar maderable	x	x	x
Monte Bajo	x	x	
Improductivo	x	x	x
Vías	*	x	*
Hidrografía natural	x		
Zona y diseminado urbano	*	*	*
Sin denominación (SD)	x	x	x

USO AGRÍCOLA	Corral	Lillo	El Romeral
ALFALFA	x		
ALMENDROS	x	x	x
AVENA	x	x	x
BARBECHO MEDIOAMBIENTAL		x	x
BARBECHO TRADICIONAL	x	x	x
CEBADA	x	x	x
ERIALES A PASTOS	x	x	x
FORESTALES MADERABLE	x	x	x
GARBANZOS	x	x	
GIRASOL	x		
GUISANTES	x	x	
HORTALIZA (NO TOMATE)	x	x	
LENTEJAS	x	x	
LINO NO TEXTIL	x	x	
MAIZ			x
MONTE BAJO	x	x	x
OLIVAR	x	x	x
OTROS CULTIVOS HERBACEOS	x	x	
OTROS CULT. INDUSTRIALES		x	
OTROS FORESTALES	x	x	
OTROS FORRAJES	x	x	x
OTROS FRUTALES	x		
PISTACHO		x	
RASTROJERA-MASACOMÚN	x	x	x
REMOLACHA	x		
RETIRADA OBLIGAT. NO FIJA	x	x	x
RETIRADA VOLUNTARIA	x	x	x
TRIGO BLANDO	x	x	x
TRIGO DURO	x	x	x
TRITICALE	x		
TUBERCULOS	x		
VEZA	x	x	x
VIÑEDO VINIFICACIÓN	x	x	x
YEROS	x	x	x

Tabla 35. Usos catastrales y agrícolas (SIGPAC) del año 2005 para los municipios del área de estudio.

¹⁸ Los usos que figuran en la tabla con un asterisco de color rojo son el resultado de la edición realizada sobre los datos originales del Catastro. En esta fuente, las zonas urbanas y las vías (en los municipios de Corral de Almaguer y El Romeral) venían caracterizadas con otro uso diferente al suyo.



Tal y como se ha descrito en la sección 4.2.2 (Fuentes de datos), la unidad básica de información del catastro de rústica es la subparcela, que tiene asociados, entre otros, el uso o aprovechamiento a que está destinada. Dada la menor fiabilidad de esta información, se decidió actualizar este atributo con los datos del SIGPAC del año 2005, estructurados en recintos agrícolas. La actualización del uso implica la identificación de objetos homólogos en las dos bases de datos, proceso complejo y problemático por los siguientes hechos:

- Empleo de diferentes unidades de información. Los recintos del SIGPAC son unidades de superficie que se establecen para la gestión y control de las ayudas comunitarias de la PAC, y establecen subdivisiones de un uso diferente al de la parcela donde se ubican. Aunque estos recintos podrían coincidir con las subparcelas del Catastro, no tienen por qué hacerlo ya que representan una estructura territorial diferente.
- En el SIGPAC no figuran los recintos relativos a subparcelas de descuento, es decir, las que representan superficies no imponibles o sin uso agrícola (vías, hidrografía, zona urbana, uso improductivo, sin datos). Por este motivo, el número de registros de esta base de datos no coincide con el de Catastro.
- Uso de sistemas de identificación diferentes. En un determinado municipio de una provincia, las subparcelas se identifican por la secuencia de valores: código de polígono + código de parcela + código de subparcela. Dado que la secuencia correspondiente a los recintos es: código de polígono + código de parcela, para diferenciar unos de otros es necesario utilizar los valores de uso y superficie de cada uno de ellos. Ante esta situación, las correspondencias entre subparcelas y recintos se basan en emparejar valores de las secuencias “código polígono + código parcela [+ *superficie subparcela*]” con “código polígono + código parcela [+ *superficie recinto*]”, respectivamente. Si los valores de superficie representaran a la misma unidad y hubieran sido calculados u obtenidos de la misma fuente, sólo en este caso, podrían usarse como campos de enlace, circunstancia que no se verifica en este proyecto. Tras realizar el enlace de registros, se podrán comparar los valores de los campos relativos al uso, ya que este atributo es el que presenta variaciones entre las dos bases de datos. Evidentemente, habrá casos en que dichos valores sean equivalentes por describir el mismo uso de suelo (por ejemplo: “pinar maderable” frente a “forestal maderable”).

SIGPAC				
MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	USO AGRÍCOLA	SUPERFICIE_HA
85	1	48	TRIGO BLANDO	3.43

CATASTRO					
MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	SUBPARCELA	USO CATASTRO	HECTAREAS
85	1	48	0	TIERRAS DE LABOR	3.50

Figura 95. Campos de relación entre las bases de datos del SIGPAC y del Catastro.



En la figura siguiente se muestra un ejemplo, correspondiente al municipio de Corral de Almaguer, del resultado de la unión relacional entre las dos bases de datos. El enlace es directo cuando los registros identifican subparcelas y recintos agrícolas equivalentes a parcelas catastrales, es decir, a una unidad de aprovechamiento homogéneo. Este es el caso de los registros en color amarillo, donde puede observarse la diferencia en los valores relativos al uso de suelo y la pequeña variación en los datos de la superficie. En los otros casos la relación es problemática. La parcela 1 del polígono 1 tiene tres subparcelas de las que, al parecer, las dos de uso improductivo podrían equivaler al recinto de cebada del SIGPAC, ya que la superficie ocupada en ambos casos es similar (0.865 ha de improductivo frente a 0.86 ha de cebada). Por el contrario, la parcela 1 del polígono 23, dedicada al viñedo, podría corresponde a los cuatro recintos agrícolas por ocupar aproximadamente la misma superficie (17.902 ha de viñedo frente a 17.93 ha de otros usos).

DATOS CATASTRO					DATOS SIGPAC			
Polígono	Parcela	Subparcela	Uso_catastral	Hectáreas	Polígono	Parcela	Uso_agrícola	Sp_ha
1	1	1	MONTE BAJO	18,691	1	1	CEBADA	0,86
1	1	3	IMPRODUCTIVO	0,532				
1	1	2	IMPRODUCTIVO	0,333				
3	1	0	PINAR MADERABLE	3,147	3	1	FORESTALES MADERABLE	3,14
4	1	0	LABOR SECANO	2,719	4	1	VEZA	2,47
7	1	0	LABOR SECANO	11,626	7	1	CEBADA	11,58
8	1	0	LABOR SECANO	12,326	8	1	CEBADA	12,3
9	1	0	VIÑA	2,495	9	1	VIÑEDO VINIFICACIÓN	2,47
10	1	0	LABOR SECANO	4,712	10	1	YEROS	4,74
12	1	0	LABOR SECANO	0,675	12	1	LENTEJAS	0,68
23	1	0	VIÑA	17,902	23	1	CEBADA	2,28
					23	1	BARBECHO TRADICIONAL	12
					23	1	CEBADA	2,7
					23	1	ERIALES A PASTOS	0,95

Figura 97. Ejemplo de unión relacional entre las bases de datos del SIGPAC y del Catastro.

En estas condiciones, carece de sentido el enlace relacional entre dos tablas cuyos registros representan unidades diferentes. No obstante, tras analizar la información contenida en ellas, se observó que, tanto en el Catastro como en el SIGPAC, el porcentaje de parcelas con un solo aprovechamiento, es decir, formadas por una única subparcela o un único recinto, era muy elevado respecto al total de registros. Los resultados de este estudio se presentan en la tabla siguiente.



MUNICIPIO	CATASTRO	SIGPAC
	% de subparcelas que son parcelas	
Corral de Almaguer	83%	82%
Lillo	80%	84%
El Romeral	91%	94%

Tabla 36. Porcentaje de parcelas con un solo aprovechamiento en los datos de Catastro y del SIGPAC.



Figura 98. Unidades agrícolas del SICPAC: parcelas (líneas en color rojo) y recintos en su interior de uso diferente (líneas en color violeta).

Ante este hecho y ante las dificultades que plantea una asociación de elementos homólogos por identificación gráfica, superponiendo la información espacial del visor del SIGPAC con la de las entidades del proyecto de SIG, se decidió utilizar **la parcela como unidad básica de información en el proyecto**. Esta decisión implica una transformación de la geometría y atributos del parcelario catastral para, posteriormente, emparejar las nuevas unidades con los recintos del SIGPAC equivalentes a una parcela, y sustituir el uso catastral por el agrícola en elementos homólogos. A continuación se describen brevemente los procesos realizados en esta fase:

1. (Parcelario catastral) Generación de la geometría de parcelas por fusión de las de sus respectivas subparcelas. En estos casos, se calcula la superficie de la nueva geometría, y se asigna como uso catastral el correspondiente a la subparcela de mayor superficie o al uso que más extensión ocupa en la parcela.



Figura 99. (a) Geometría de subparcelas antes de la fusión. (b) Geometría de parcelas tras la fusión.

2. (SIGPAC) Eliminación de los registros correspondientes a los recintos de menor superficie de una parcela, de forma que la base de datos sólo contiene información relativa a las parcelas de uso agrícola de la zona de estudio.

MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	Descripción uso	Superficie_ha
54	1	7	CEBADA	12,75
54	1	8	RETIRADA VOLUNTARIA	3,68
54	1	8	RETIR. OBLIG. NO FIJA	12,43
54	1	10	LENTEJAS	3,05
54	1	9	RETIRADA VOLUNTARIA	1,62
54	1	13	ERIALES A PASTOS	0,19
54	1	13	CEBADA	2,97

Tabla 37. Tabla inicial de recintos agrícolas del SIGPAC.

MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	Descripción uso	Superficie_ha
54	1	2	CEBADA	2,82
54	1	7	CEBADA	12,75
54	1	8	RETIR. OBLIG. NO FIJA	12,43
54	1	10	LENTEJAS	3,05
54	1	9	RETIRADA VOLUNTARIA	1,62
54	1	13	CEBADA	2,97

Tabla 38. Tabla final del SIGPAC con las unidades correspondientes a los recintos de mayor superficie de una parcela.

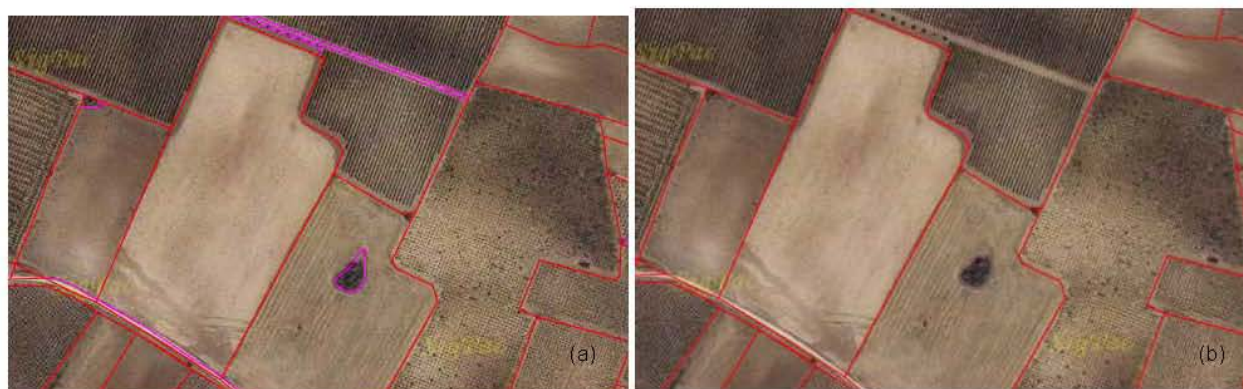


Figura 100. Representación gráfica de las geometrías de los recintos del SIGPAC, (a) antes y (b) después del proceso de eliminación de los recintos de menor dimensión declarados en cada parcela.



3. Unión relacional entre las tablas del parcelario de cada uno de los municipios y la tabla del SIGPAC. El enlace se realiza usando los campos: código de municipio, código de polígono y código de parcela. En estos casos, se sustituye el uso catastral por el uso agrícola. Los registros de las parcelas catastrales correspondientes a superficies no imponibles o sin aprovechamiento agrícola conservan su uso catastral. Este dato se utilizará en el cálculo de la superficie forrajera equivalente de la parcela.

Municipio	Polígono	Parcela	Uso_catastro	Superficie_catastro	Uso_agrícola	Superficie_SIGPAC
150	67	1	C-	1,05	CEBADA	1,06
150	14	2	C-	8,99	TRIGO DURO	7,56
150	71	1	C-	2,42	CEBADA	2,3
150	72	1	CE	1,41	LENTEJAS	1,41
150	74	1	CE	9	CEBADA	8,75

Tabla 39. Resultado del enlace entre el parcelario de un municipio y la base de datos del SIGPAC.

La base de datos catastral, obtenida tras finalizar estos procesos, consta de tres tablas relacionales con el siguiente número de registros (parcelas):

MUNICIPIO	Nº PARCELAS	Nº parcelas de tipo descuento
Corral de Almaguer	12244	589
Lillo	10429	848
El Romeral	9240	918

Tabla 40. Número total de parcelas y de superficies de descuento en los municipios del área de estudio.



4.2.5 Edición estructural. Cálculo de FAE

Este proceso tiene por finalidad singularizar e individualizar cada una de las entidades que componen el modelo de un proyecto SIG, asociando a cada una de ellas los atributos y los datos espaciales que las definen. En esta fase se pueden realizar procesos tales como:

- Construcción de entidades geográficas a partir de datos espaciales, de forma que su representación espacial sea la que corresponde a la realidad geográfica.
- Asociación de los atributos de cada entidad a sus correspondientes datos espaciales.
- Revisión y validación de las entidades.

En este proyecto la fase de edición estructural se reduce a la compleción de los atributos definidos para la clase “parcelas”, más en concreto, al cálculo y asociación de los valores correspondientes a la superficie forrajera equivalente (FAE). En los procesos realizados anteriormente ya se han construido las entidades geográficas del modelo de datos, a excepción de los polígonos de pasto que es una clase que se genera como resultado de la explotación del proyecto de SIG.

Tal y como se ha descrito en el capítulo anterior, para la gestión agropecuaria de la zona de estudio es necesario cuantificar la producción potencial de pasto de las parcelas agrícolas, es decir, su superficie forrajera equivalente (FAE), que se calcula en función del tipo de cultivo y de la superficie que éste ocupa.

A cada tipo de cultivo o aprovechamiento se le asigna un coeficiente forrajero normalizado, que indica el número de cabezas de ganado ovino que son alimentadas con 1 Ha de dicho cultivo durante un año. El rango de valores de este coeficiente está comprendido entre 0 y 10, de manera que el mínimo corresponde a usos improductivos y el máximo a cultivos de tipo alfalfa. En la sección 3.2 se indican los coeficientes para los usos del suelo del área de estudio, detallando el tipo de forraje a que puede destinarse cada uno de ellos.

Una vez clasificados los usos, se relacionan sus coeficientes con la superficie de cada parcela mediante el cálculo de la superficie forrajera equivalente (FAE), aplicando la siguiente fórmula:

$$FAE_j = Área_j \times CF_j$$

FAE_j = superficie forrajera equivalente de una parcela j (x_j),

$Área_j$ = superficie de x_j ,

CF_j = coeficiente forrajero correspondiente al tipo de cultivo existente en x_j .

Para completar la carga de atributos de las parcelas del área de estudio, hay que calcular su valor de FAE y almacenar el resultado en el campo correspondiente. La producción potencial anual de forraje es un dato imprescindible en el proceso de zonificación o diseño de polígonos de pasto.



Dado que no todas las parcelas tienen un uso de suelo compatible con el aprovechamiento forrajero, no sólo hay que diferenciar las parcelas aptas para el pastoreo de las que no son, sino también de las que carecen de aprovechamiento alguno pero admiten el tránsito de ganado (vías de comunicación, terrenos improductivos), así como de las parcelas que representan los núcleos de población. Para considerar estas diferencias, se han asignado los siguientes valores al atributo FAE_{xj} de cada parcela:

- ✓ $FAE = 0$, para vías de comunicación y parcelas improductivas.
- ✓ $FAE = -2$, para núcleos de población. Los núcleos pueden tener la consideración de accesibles o no al ganado, según criterios de los Ayuntamientos y de la Comisión Local de Pastos.
- ✓ $FAE > 0$, para parcelas que son un recurso pastoral. El valor almacenado corresponde a FAE_j .
- ✓ $FAE = -1$, para parcelas no accesibles al ganado por tener un uso incompatible con el pastoreo.

La tabla siguiente resume las características de los usos del suelo del área de estudio, indicando sus valores de coeficiente forrajero, FAE, disponibilidad como recurso pastoral y admisión o no del tránsito del ganado.

CARACTERÍSTICAS PASTORALES DE LOS USOS DEL SUELO				
USOS DEL SUELO	CF	FAE	Uso pastoral	Admite tránsito de ganado
PASTOS DE REGADÍO: Prados, alfalfa	10	> 0	SI	SI
FORRAJE DE REGADÍO: (<i>maíz forrajero</i>), sorgo	8			
CEREALES VERDES (GRANO): veza, maíz	5			
LEGUMINOSAS DE FORRAJE	4			
GIRASOL	1.5			
LEGUMINOSAS DE GRANO: Lentejas, guisantes, judías, garbanzos, yeros				
CEREALES DE INVIERNO (y rastrojera): avena, cebada, trigo duro/blando, triticale	1			
PASTOS NATURALES (pastos)	0.75			
DEHESAS: Dehesas, labor con encinas				
BARBECHOS: Retirada Obligatoria No fija y Retirada Voluntaria	0.5			
Barbechos medioambientales y tradicionales				
BOSQUE MEDITERRANEO: Monte bajo				
ERIAL (erial a pastos)	0.25			

Tabla 41. Tabla resumen de las características pastorales de los usos del suelo del área de estudio (I).



CARACTERÍSTICAS PASTORALES DE LOS USOS DEL SUELO				
USOS DEL SUELO	CF	FAE	Uso pastoral	Admite tránsito de ganado
ALMENDROS, OLIVOS, VIÑEDOS, HORTALIZAS, REMOLACHA, LINO, TUBÉRCULOS, FORESTALES MADERABLES, OTROS (CULTIVOS HERBÁCEOS, FORESTABLES, FRUTALES)	0	-1	NO	NO
HIDROGRAFIA	0			
VIAS, IMPRODUCTIVO		0		SI
ZONA URBANA		-2		NO / SI

Tabla 42. Tabla resumen de las características pastorales de los usos del suelo del área de estudio (II).

Una vez calculado el valor de FAE de cada una de las parcelas del área de estudio, es posible representar gráficamente la distribución de los recursos pastorales en cada municipio.

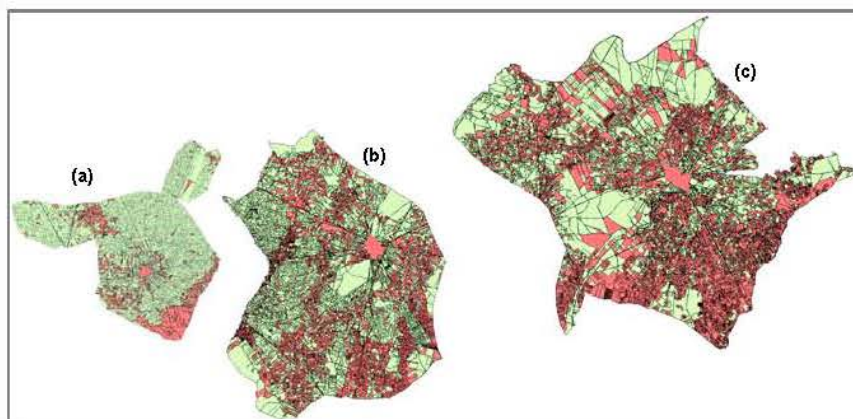


Figura 101. Visualización de las parcelas accesibles [$FAE \geq 0$] (color verde) y no accesibles al ganado [$FAE < 0$] (color rojo) en los municipios de El Romeral (a), Lillo (b) y Corral de Almaguer (c).

La aplicación diseñada para el trazado automático de los polígonos de pasto, analizará los datos de FAE para clasificar las parcelas según los tipos descritos anteriormente. Esta clasificación se basa en asignar valores a las variables booleanas “acceso” y “aprovechamiento”, usadas para indicar, en el primer caso, si (1) es posible o (0) no transitar por la parcela, y en el segundo, si ésta (1) es un recurso pastoral que puede ser explotado por el ganado o (0) no lo es. Inicialmente, la aplicación asignará a estas variables los siguientes valores en cada parcela:

Usos de parcelas	FAE	Aprovechamiento inicial	Acceso inicial
Recurso pastoral	> 0	1 (SI)	1 (SI)
Sin aprovechamiento (vias...)	$= 0$	0 (NO)	1 (SI)
Zona urbana	$= -2$	0 (NO)	1/0 (SI/NO)
Usos vedados al ganado	$= -1$	0 (NO)	0 (NO)

Tabla 43. Valores iniciales de las variables “aprovechamiento” y “acceso” en función del atributo FAE de las parcelas.



Tras finalizar todos los procesos de edición, se dispone de una base de datos geográfica que se caracteriza por ser continua en la zona de estudio, homogénea y concordante con la realidad geográfica según el modelo de datos definido para el proyecto de SIG.

MUNICIPIO	POLIGONO	PARCELA	USO_CATASTRO	USO_AGRÍCOLA ¹⁹	SUPERFICIE	FAE	Pol_Pasto
85	2	1	V-	VIÑEDO VINIFICACIÓN	1.123796	-1.0	
85	3	1	C-	OTROS CULTIVOS	1.124712	1.124712	
85	7	1	C-	CEBADA	62.8214	62.8214	
85	8	1	V-	OLIVAR	0.9887179	-1.0	
85	9	1	V-	VIÑEDO VINIFICACIÓN	0.7371376	-1.0	
150	44	172	F-	ALMENDROS	0.5670102	-1.0	
150	22	214	RI	ÁRBOLES DE RIBERA	5.335336	0.0	
150	7	44	C-	AVENA	50.87332	50.87332	
150	37	81	C-	B. MEDIOAMBIENTAL	2.073259	1.036629	
54	79	23	C-	ALFALFA	0.1442919	1.442919	
54	40	233	C-	ALMENDROS	1.990753	-1.0	
54	62	108	CE	AVENA	2.113362	2.113362	
54	31	12	CR	ALFALFA	3.969309	39.69309	

Tabla 44. Ejemplo de la tabla de datos asociada al parcelario del área de estudio, como resultado de los procesos de integración y edición.

¹⁹ Para facilitar la interpretación de los datos, en este ejemplo se han sustituido los identificadores numéricos del uso agrícola predominante en la parcela por su correspondiente descripción literal (fuente: SIGPAC).

4.2.6 Preproceso de datos: división de la red viaria

Una de las finalidades de este proyecto es la agregación de las unidades catastrales (parcelas) en polígonos de pasto, para facilitar la asignación de recursos pastorales a los ganaderos del área de estudio. La creación del nuevo sistema zonal toma como punto de partida la estructura ya existente de unidades catastrales. Este hecho implica la herencia de todas las propiedades de dicha estructura. En esta aplicación y en otras de similares características, la definición espacial de los polígonos supone la creación de unas zonas que han de ser conexas, sin que sea necesario que formen recintos compactos -por la restricción que supone la ubicación predeterminada de los apriscos-. Cada zona generada es el resultado de la fusión espacial de un conjunto de parcelas, por lo que su geometría, forma y dimensiones, estará condicionada por la geometría de estas unidades. El parcelario de los municipios estudiados, incluye tanto los recintos de naturaleza rústica como las superficies no imponibles o de descuento, entre las que se encuentra el viario. La geometría de las parcelas de la red viaria se caracteriza por tener un gran perímetro y una superficie mínima, tal y como puede observarse en la figura siguiente.



Figura 102. Ejemplos de la geometría característica de las parcelas del viario -(a) en color verde, (b) en color azul-.

Si se procediera a definir las zonas usando la geometría original del viario, se obtendrían polígonos de pasto de formas irregulares o “anómalas”, tal y como se muestra en estas imágenes.

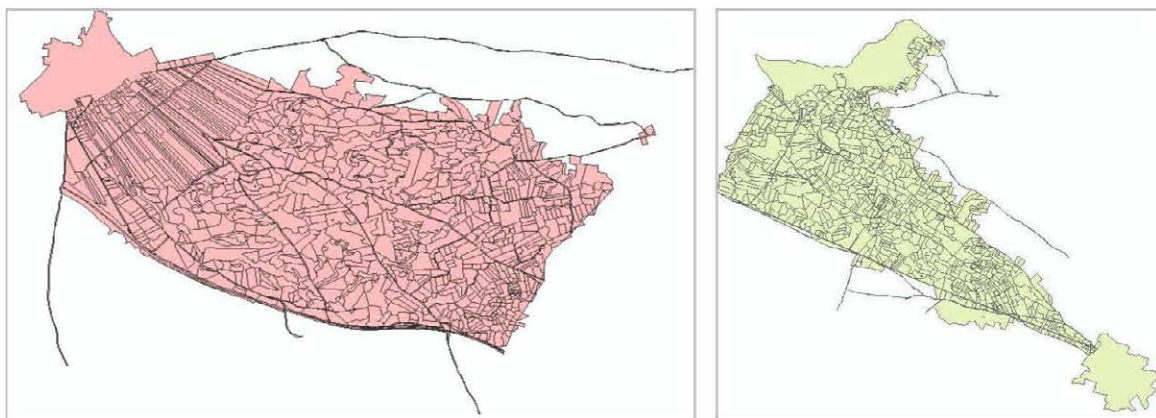


Figura 103. Ejemplos de polígonos de pasto formados a partir de las geometrías originales del parcelario de catastro (I).

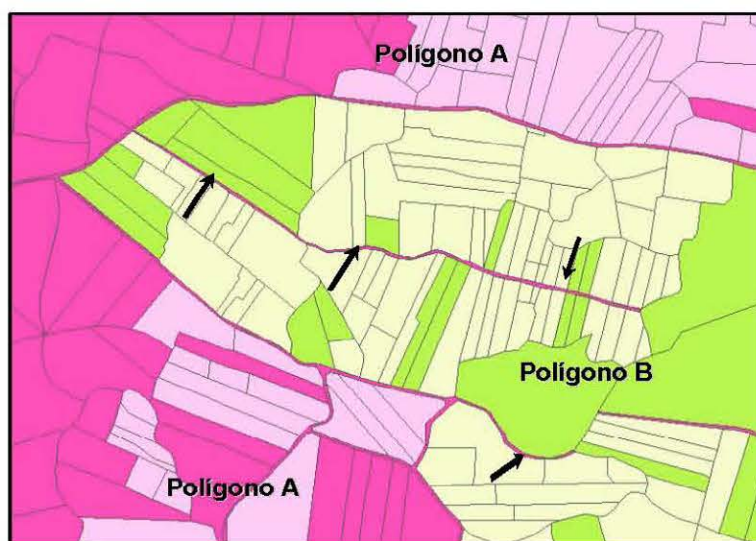


Figura 104. Ejemplo de polígonos de pasto formados a partir de las geometrías originales del parcelario de catastro (II).

La solución adoptada para evitar la formación de polígonos con formas anómalas consistió en la fragmentación del viario, dividiendo los caminos en varios recintos según los puntos de intersección con las parcelas adyacentes.



Figura 105. Parcelario catastral: (a) antes y (b) después de la división del viario.

Dado el elevado número de unidades catastrales que componen el parcelario de los municipios del área de estudio, se intentó automatizar lo máximo posible el proceso de división de la red viaria.

MUNICIPIO	Nº de PARCELAS	Nº de parcelas del tipo VIA
Corral de Almaguer	12244	437
Lillo	10429	260
El Romeral	9240	371

Tabla 45. Número de parcelas del viario en los municipios del área de estudio.

El proceso empleado consta de las siguientes fases:

1. Trazado del eje del viario: línea de división longitudinal, paralela a los bordes de los caminos. Para realizar este proceso hubo que transformar a geometría de línea las superficies de las parcelas del viario.

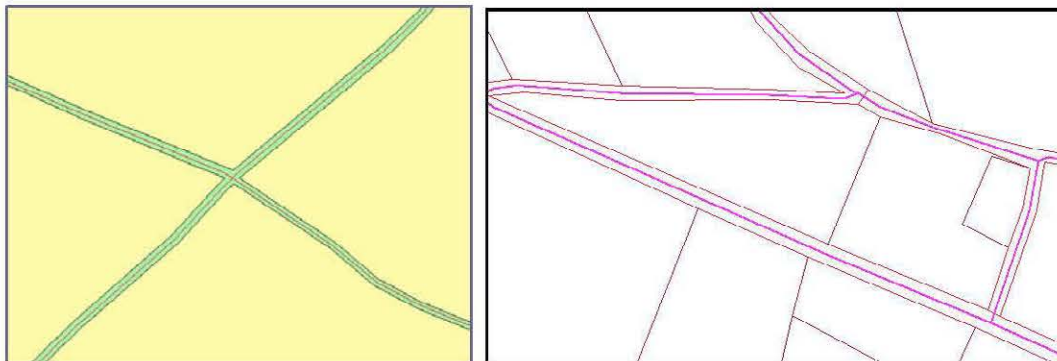


Figura 106. Ejemplos del trazado de la línea eje del viario.

2. Edición del eje del viario. El trazado automático de esta línea presenta algunas anomalías geométricas que hay que corregir. La mayoría de los errores aparecen en las intersecciones o cruces de caminos, donde el eje no queda interior a los límites o bordes del viario. En estos casos se realizó un proceso de corrección manual. La siguiente figura es un ejemplo de un eje antes y después del proceso de edición geométrica.

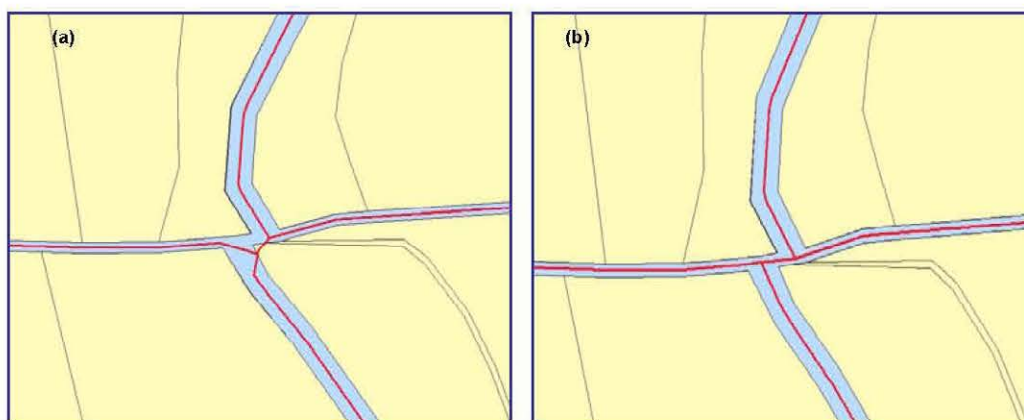


Figura 107. Ejemplos de un eje del viario (a) antes y (b) después de la edición geométrica.

3. Cálculo de los nodos de intersección de las parcelas, cuyo uso es diferente al de “vía”, con las parcelas del viario. Para obtener dichos nodos fue necesario realizar una serie de procesos, tales como:
 - Transformar a geometría de línea las superficies de las parcelas que no formaban parte del viario.
 - Intersecar las líneas del viario con las generadas en la fase anterior.
 - Eliminar del conjunto intersección todas las geometrías excepto las de tipo punto.

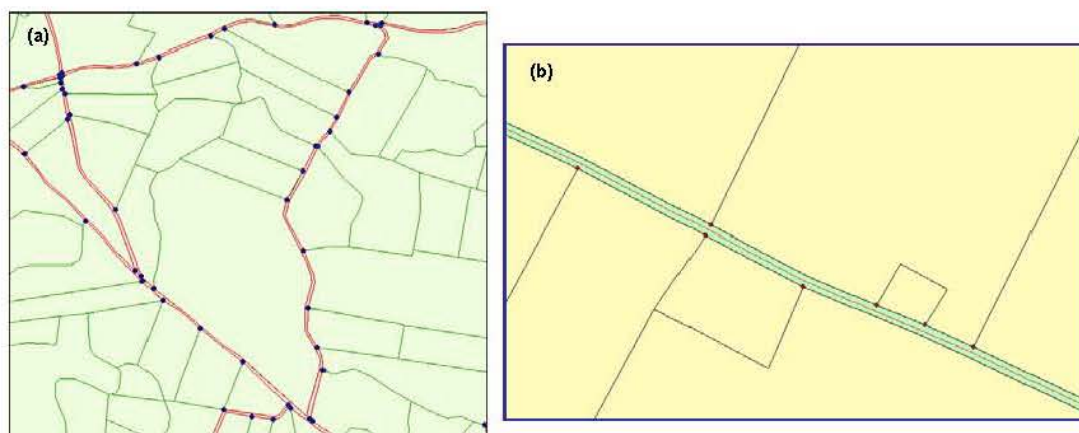


Figura 108. Ejemplos de nodos de intersección entre parcelas y viario.

4. Trazado de líneas de división: líneas perpendiculares a los ejes del viario desde los nodos de intersección. Esta fase se ha ejecutado automáticamente creando una macro en Visual Basic que realiza el proceso siguiente: por cada nodo del conjunto intersección, se localiza la línea del eje del viario más cercana y, desde este punto, se traza un segmento perpendicular a dicha línea.

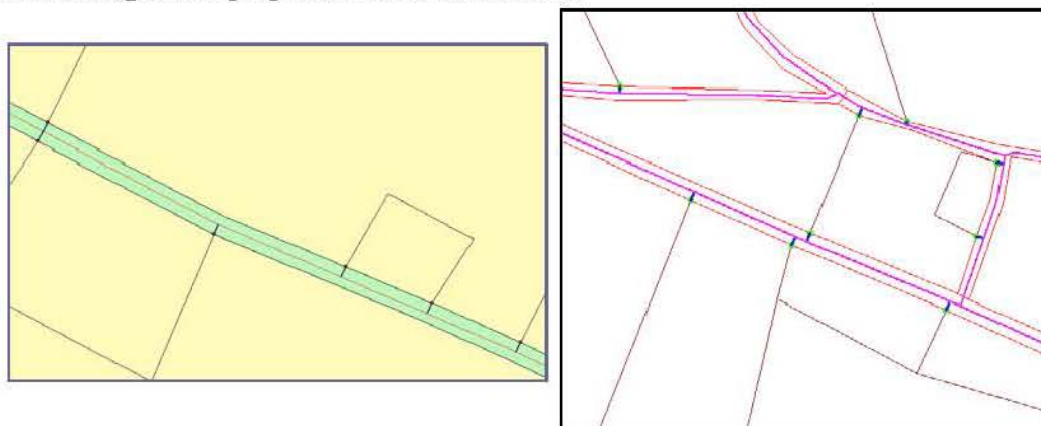


Figura 109. Ejemplos del trazado de líneas perpendiculares a los ejes del viario.

5. Generación de geometrías de área. A partir del conjunto de líneas integrado por los bordes y ejes del viario más las líneas transversales a dichos ejes, se forman unos recintos que serán las nuevas parcelas del viario.

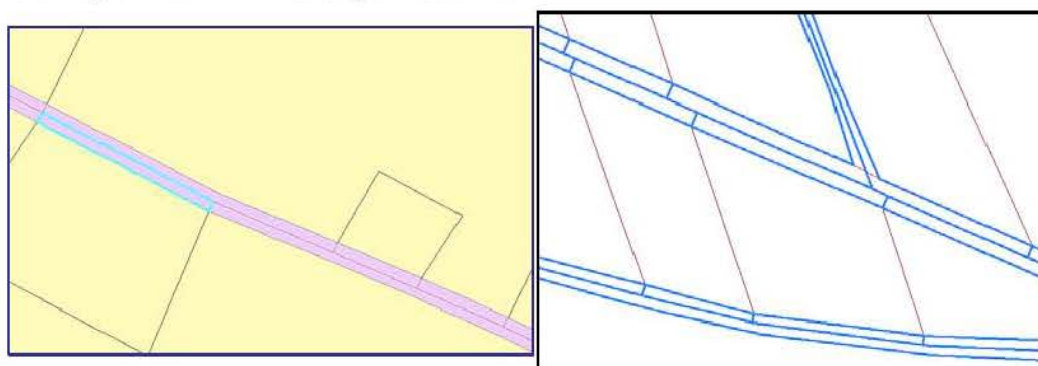


Figura 110. Ejemplos de las geometrías de área correspondientes a la división del viario.

6. Edición de los nuevos recintos. La generación automática de geometrías de área ha dado lugar a una serie de recintos anómalos que deberían ser eliminados, ya que incrementan el número final de parcelas y, en algunos casos, pueden obstaculizar el funcionamiento del algoritmo para la formación de polígonos de pasto. La mayoría de estos recintos se caracterizan por tener una superficie muy pequeña, generalmente inferior a 5 m^2 , y una proporción mínima entre dicha superficie y el perímetro al cuadrado, $0.0000010 \leq \text{área}/(\text{perímetro})^2 \leq 0.072210$. Si se aplican estos criterios, es posible localizar estos recintos y proceder a su edición.

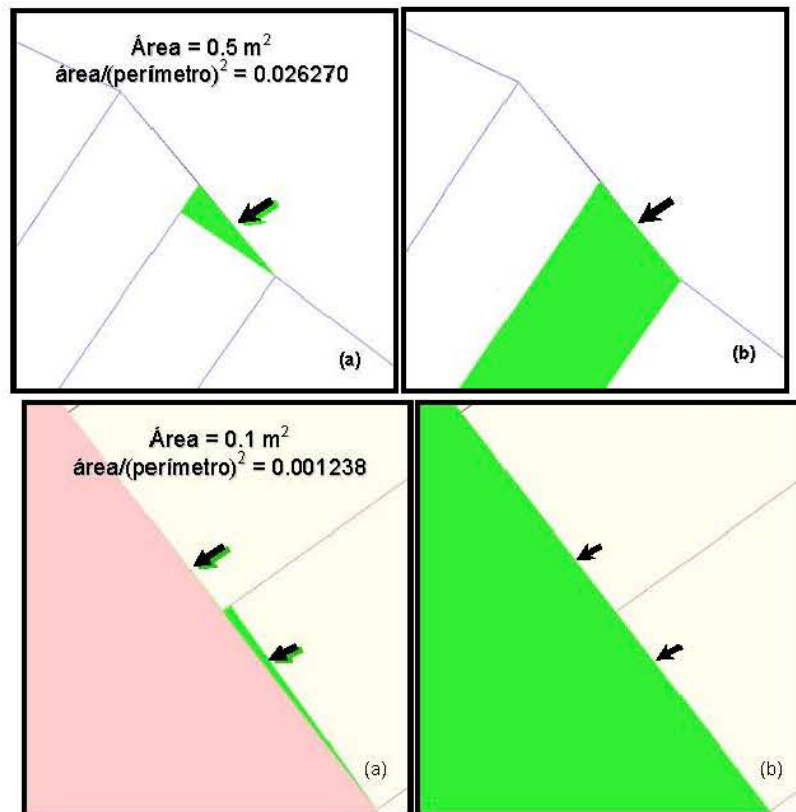


Figura 111. Antes (a) y después (b) del proceso de edición de las geometrías obtenidas por división del viario.

7. Sustitución de la geometría de las parcelas del viario original por la obtenida en el proceso de división. Para llevar a cabo esta fase, es necesario que dichas geometrías hereden los atributos de las parcelas de tipo vía a las que van a sustituir. Una vez realizada esta operación, se pueden eliminar dichas entidades y sustituirlas por los nuevos recintos generados.

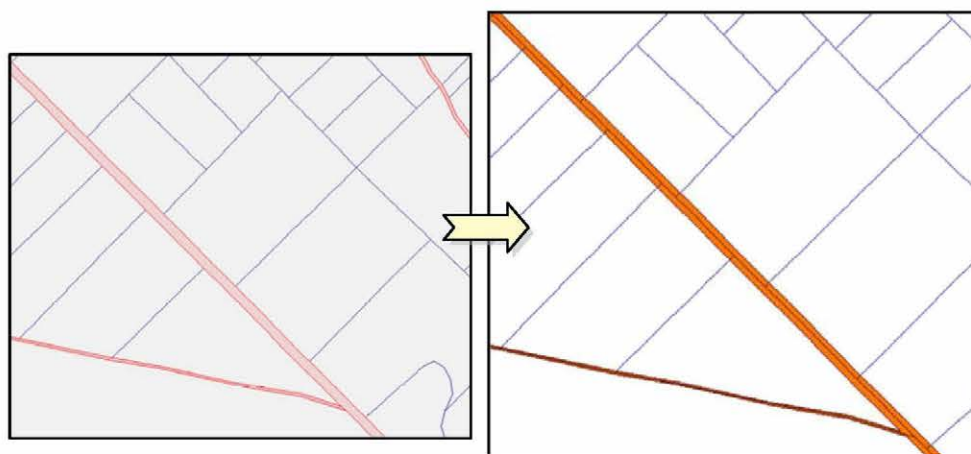


Figura 112. Sustitución de la geometría original de las parcelas del viario por la obtenida en el proceso de división.

Tras finalizar el proceso de división de los recintos del viario, el parcelario de los municipios del área de estudio consta de las unidades catastrales que se muestran en el gráfico y cuyo número se indica en la tabla siguiente.

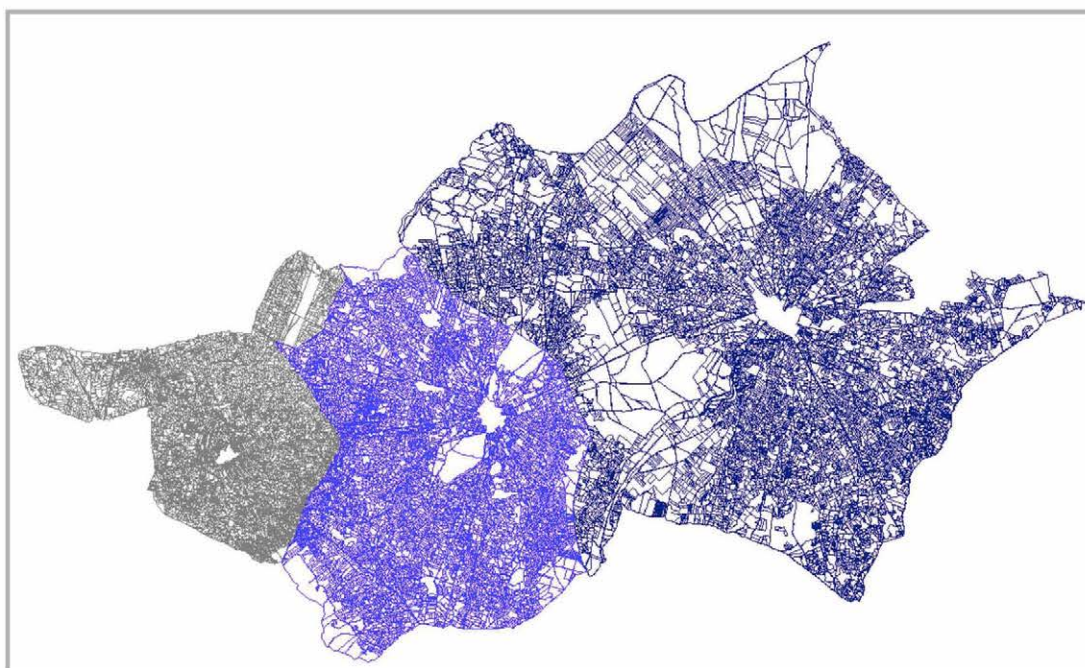


Figura 113. Parcelario del área de estudio obtenido tras el proceso de división del viario.

	PROCESO DE DIVISIÓN DE LAS PARCELAS DEL VIARIO	
	ANTES DEL PROCESO	DESPUÉS DEL PROCESO
MUNICIPIO	Nº de PARCELAS	Nº de PARCELAS
Corral de Almaguer	12244	21037
Lillo	10429	17539
El Romeral	9240	15496

Tabla 46. Número total de parcelas en los municipios del área de estudio, antes y después de la división del viario.



4.3 Resultados: generación de polígonos de pasto

Para validar, en el ámbito asociado a la gestión de sistemas agropecuarios extensivos, el modelo de solución descrito en el capítulo 3, y analizar las posibilidades y el rendimiento de la aplicación prototipo desarrollada, se han realizado una serie de pruebas con los datos de los municipios del área de estudio: Lillo, Corral de Almaguer y El Romeral. Estos municipios difieren en forma, tamaño y en la configuración geométrica de su parcelario catastral. La tabla siguiente contiene un resumen de estas características.




Municipio	Superficie (ha)	FAE total	Número de parcelas	Nº de parcelas tras la división de caminos	
<i>El Romeral</i>	7964	5212.78	9240	15496	
<i>Lillo</i>	15143	7710.07	10429	17539	
<i>Corral de Almaguer</i>	32715	19589.15	12244	21037	

Tabla 47. Resumen de las características de los municipios del área de estudio.

El conjunto de datos de entrada a la aplicación está formado por el total de unidades básicas del área de estudio. Estas unidades se corresponden con las parcelas del catastro de rústica de los municipios, a excepción de las del tipo “vías de comunicación o caminos”, que han sido sometidas a un proceso de segmentación para adaptar su dimensión longitudinal a la de las parcelas adyacentes. Este proceso de división aumenta considerablemente el número de unidades a procesar y penaliza el rendimiento de la aplicación.



Los atributos temáticos y espaciales de las unidades de cada municipio se almacenan en una tabla de una base de datos Access generada con el programa GeoMedia Professional v.6.1.²⁰

PARCELAS EL ROMERAL							
ID_R	Municipio	Parcela	Polígono	Uso catastral	Uso agrícola	FAE	Superficie_ha
17	150	1	17	E-	PASTOS	0.49	0.651100
18	150	1	18	C-	BARBECHO TRADICIONAL	0.25	0.51001
19	150	1	19	MM	FORESTALES MADERABLE	-1.00	0.68024
20	150	1	20	V-	VIÑEDO VINIFICACIÓN	-1.00	0.74991
59	150	2	14	C-	OTROS CULTIVOS HERBACEOS	0.59	0.59032
60	150	214	22	RI	ÁRBOLES DE RIBERA	0.00	5.33533
61	150	2	16	I-	IMPRODUCTIVO	0.00	0.12553

PARCELAS CORRAL DE ALMAGUER							
ID_C	Municipio	Parcela	Polígono	Uso catastral	Uso agrícola	FAE	Superficie_ha
33	54	3	92	V-	VIÑEDO VINIFICACIÓN	-1.00	1.98954
34	54	3	93	C-	BARBECHO TRADICIONAL	0.78	1.56668
35	54	0	1	SN	SIN DATOS	-1.00	0.11187
36	54	0	18	SN	SIN DATOS	-1.00	0.12152
37	54	233	40	C-	ALMENDROS	-1.00	1.99075

PARCELAS LILLO							
ID_L	Municipio	Parcela	Polígono	Uso catastral	Uso agrícola	FAE	Superficie_Ha
10155	150	429	41	V-	VIÑEDO VINIFICACIÓN	-1.00	1.57862
10156	150	430	28	C-	OTROS CULTIVOS HERBACEOS	1.39	1.38622
10158	150	430	32	C-	BARBECHO TRADICIONAL	0.94	1.88605
10159	150	430	41	C-	OTROS CULTIVOS HERBACEOS	0.79	0.79458
10224	150	9001	3	VT	VIAS	0.00	0.04779
10225	150	9001	3	VT	VIAS	0.00	0.01701

Tabla 48. Tablas de datos del parcelario de cada uno de los municipios del área de estudio.

Tal y como se ha descrito en secciones anteriores, en el área de estudio existen parcelas que, siendo un recurso pastoral, tienen una ubicación espacial que las hace inaccesibles al ganado e impide su aprovechamiento. La aplicación permite identificar este tipo de parcelas para sustraer su superficie forrajera de la del polígono de pasto al que han sido asignadas. De esta forma, el resultado generado por el programa indica el tamaño real de cada polígono, descontando la superficie pastoral inaccesible.

²⁰ Para facilitar la interpretación de los datos, en este ejemplo se han sustituido los identificadores numéricos del uso agrícola predominante en la parcela por su correspondiente descripción literal (fuente: SIGPAC).

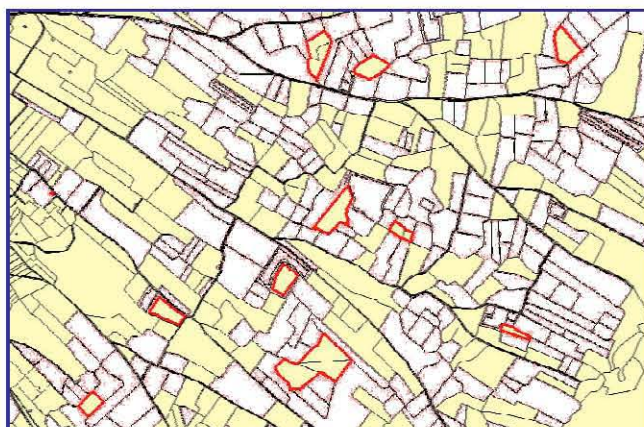


Figura 114. Ejemplo de parcelas de pasto “no accesibles” (parcelas resaltadas con borde en color rojo).

Como paso previo antes de realizar cualquier zonificación, para evaluar la importancia de las parcelas de pasto inaccesibles, se hizo un estudio del número existente en cada municipio, obteniéndose los datos siguientes:

Municipio	Nº original de parcelas	Nº parcelas no aptas para el pastoreo y no transitables	<i>Nº parcelas de pasto inaccesibles</i>	Nº total de parcelas no transitables por el ganado
El Romeral	9240	2576 (= 27.89%)	49 (= 0.52%)	2625 (= 28.41%)
Lillo	10429	5328 (= 51.1%)	96 (= 0.92%)	5424 (= 52.02%)
Corral de Almaguer	12244	7371 (= 60.2%)	187 (= 1.53%)	7558 (= 61.73%)

Tabla 49. Resumen del total de parcelas de cada municipio, indicando el nº de parcelas no transitables por el ganado.

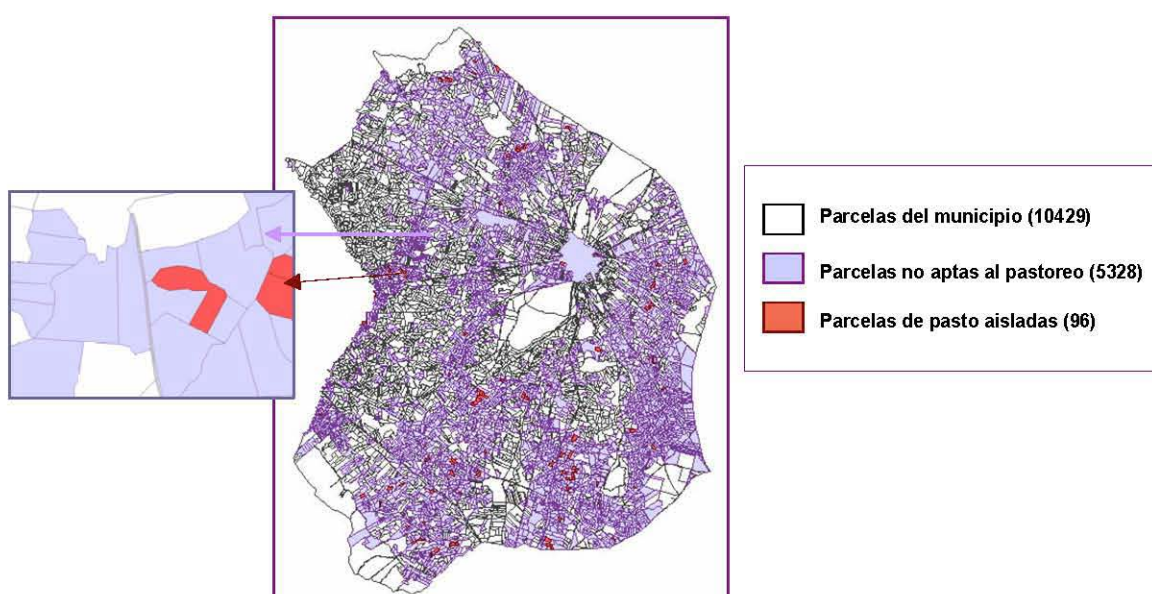


Figura 115. Ejemplo de distribución de parcelas “no transitables” en el municipio de Lillo.



Tal y como se observa en la tabla, el número de parcelas de pasto inaccesibles representa un porcentaje mínimo del total de parcelas de cada municipio, un valor inferior al 2%. Por este motivo, y para evitar el problema de obtener una solución final no válida, tal y como puede comprobarse en los ejemplos que se presentan, se optó por cambiar la condición de parada del bucle referente al error relativo de los polígonos de pasto, modificando el umbral de tolerancia del 10 al 5% ($|e_i| > 0.05$). Al disminuir este umbral, las regiones obtenidas tendrán un tamaño $a(z_i)$ con un exceso o defecto de FAE inferior al 5% del valor $A(z_i)$ especificado por el usuario. Si $a(z_i)$ se calcula de nuevo, descontando la superficie forrajera equivalente de las parcelas de pasto no accesibles al ganado, se podría asumir que el tamaño real de los polígonos de pasto estaría en un intervalo de una amplitud del $\pm 10\%$ alrededor del tamaño objetivo, es decir, $0.9(A_i) \leq a(z_i) \leq 1.1(A_i)$. Aunque en el área de estudio el número de parcelas de pasto inaccesibles no supera el 2% del total, su distribución espacial es muy irregular y no se puede garantizar que su presencia en los polígonos de diferentes zonificaciones sea homogénea, existiendo la posibilidad de que se generen regiones cuyo tamaño no pertenezca al intervalo anterior. Por este motivo, se han realizado un conjunto de pruebas para verificar si el nuevo umbral de tolerancia para el error relativo, $|e_i| \leq 0.05$, es el adecuado en el área de estudio. Los resultados obtenidos, en un 95% de los casos, confirman la validez de dicho umbral.

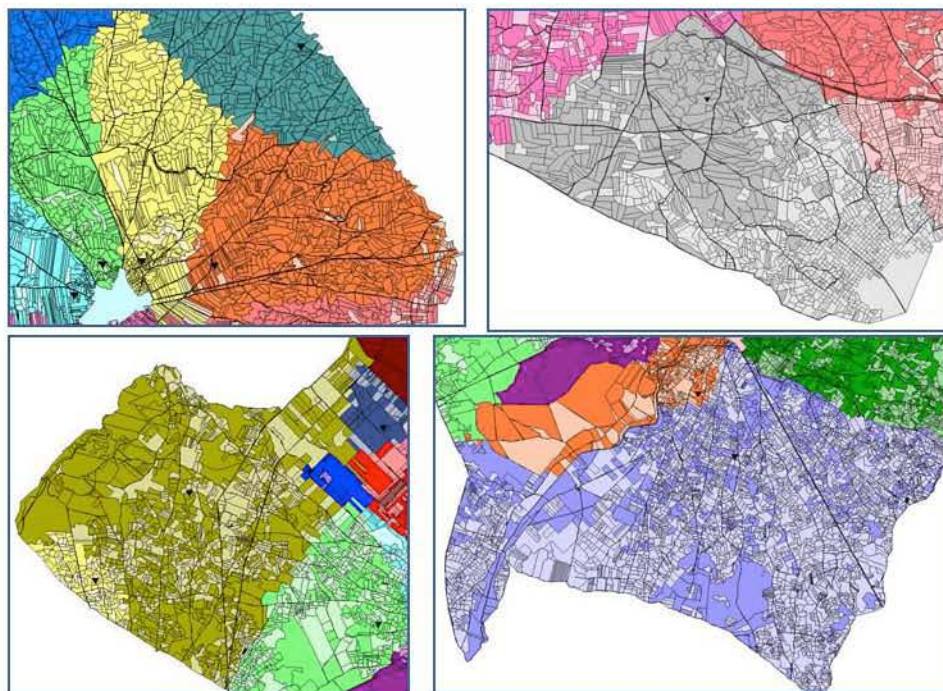


Figura 116. Ejemplos de distribución de parcelas “no transitables” en diferentes polígonos de pasto.

Para cuantificar la proporción de superficie que en cada polígono ocupan las parcelas que no son transitables por el ganado ni pueden ser utilizadas como recurso pastoral, la aplicación calcula un “índice de porosidad” que puede variar entre 0 y el valor ∞ , es decir, cuando el polígono de pasto es accesible o inaccesible por completo al ganado. Si el valor del índice es



inferior a la unidad, $\text{Porosidad}(z_i) < 1$, el polígono tiene una mayor proporción de terreno transitable independientemente de la forma y distribución espacial de las unidades no accesibles. Los polígonos serán más idóneos, desde el punto de vista del aprovechamiento como recurso pastoral, cuanto más se aproxime a cero su índice de porosidad.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los municipios del área de estudio, considerando un número diferente de apriscos y un máximo de 50000 iteraciones. En los tres primeros ejemplos, el proceso de ajuste de la superficie forrajera equivalente da lugar a polígonos de pasto con un error relativo superior al 10% del tamaño prefijado. En el municipio de Lillo, una vez que se descuenta la FAE correspondiente a las parcelas de pasto inaccesibles, el polígono 4 pasa de tener un error de -9.97% a -11.68%. En el municipio de El Romeral sucede lo mismo con el polígono 3, que pasa de un error de -9.94% a -12.70%, y en Corral de Almaguer el polígono 4 pasa de -8.36% a -12.89%. Estos y otros casos ponen de manifiesto la necesidad de disminuir el umbral de tolerancia para el error, de modo que en la solución final todos los polígonos verifiquen:

$$0.9A(z_i) \leq a(z_i)^{\text{ajustada}} \leq 1.1A(z_i)$$

Municipio: <i>Lillo</i>	Tamaño (FAE)			Porosidad
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{\text{ajustada}}$	
Polígono 1	1000	1003,344 (e = 0.33%)	997.642 (e = -0.23%)	0.270515
Polígono 2	1700	1679.471 (e = -1.21%)	1652.727 (e = -2.78%)	0.360278
Polígono 3	800	855.659 (e = 6.95%)	855.659 (e = 6.96%)	0.233838
Polígono 4	1900	1710.501 (e = -9.97%)	1678.007 (e = -11.68%)	0.543658
Polígono 5	1050	1126.373 (e = 7.27%)	1124.187 (e = 7.06%)	0.357374
Polígono 6	1260	1334.725 (e = 5.93%)	1329.869 (e = 5.54%)	0.241985

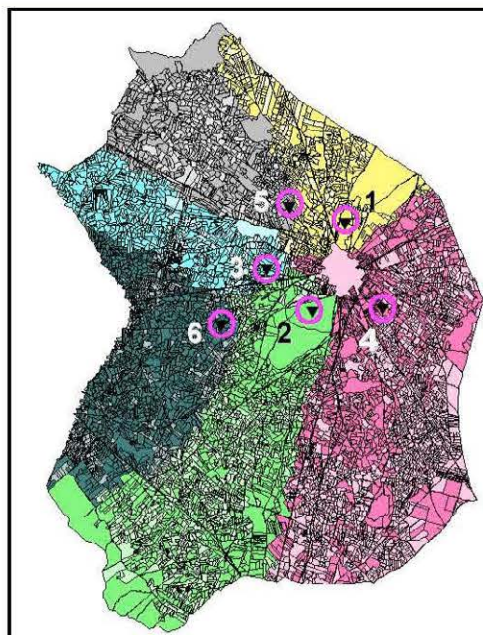


Figura 117. Municipio de Lillo. Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($|e_i| < -0.1$).



Municipio: <i>El Romeral</i>	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	2200	2275.537 (e = 3.43%)	2262.347 (e = 3.43%)	0.09453
Polígono 2	850	885.3854 (e = 4.16%)	884.357 (e = 4.04%)	0.03858
Polígono 3	1500	1350.86 (e = -9.94%)	1309.366 (e = -12.70%)	0.33630
Polígono 4	662	700.558 (e = 5.82%)	678.30 (e = 2.46%)	0.146270

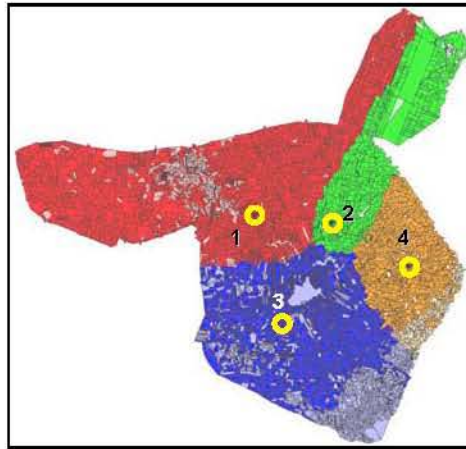


Figura 118. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos ($|e_i| \leq 0.1$).

Municipio: <i>Corral de Almaguer</i>	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	4500	4308.35 (e = -4.26%)	4227.80 (e = -6.05%)	0.46405893
Polígono 2	6000	6396.90 (e = 6.62%)	6358.13 (e = 5.97%)	0.37249096
Polígono 3	4000	4220.52 (e = 5.51%)	4204.95 (e = 5.12%)	0.31320605
Polígono 4	5089	4663.39 (e = -8.36%)	4432.85 (e = -12.89%)	0.590172

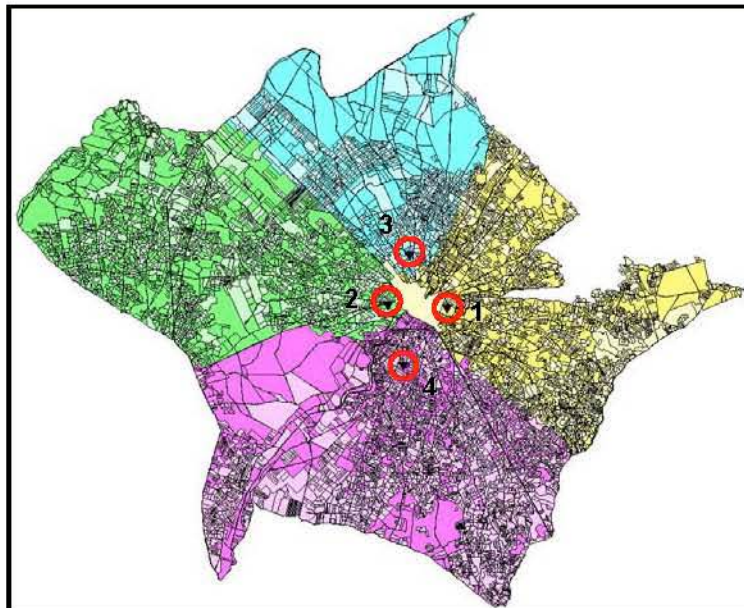


Figura 119. Municipio de Corral de Almaguer. (a) Resultado de una partición considerando 4 apriscos ($|e_i| \leq 0.1$).



Si se mantiene como umbral de tolerancia para el error relativo un valor del 10%, todos los polígonos obtenidos en las zonificaciones siguientes serían válidos ya que su superficie forrajera ajustada verifica $0.9A(z_i) \leq a(z_i)^{ajustada} \leq 1.1A(z_i)$. Si se hubiera aplicado un umbral del 5%, las soluciones habrían sido ligeramente diferentes al realizarse un mayor número de iteraciones en el proceso. La aparición de polígonos con un error final $|e_i| > 0.05$ exige calcular nuevas zonificaciones hasta que todas las regiones verifiquen la condición de parada. Estos casos se muestran en color azul en las tablas de datos que acompañan a los gráficos.



Municipio: Lillo	(a) $ e_i \leq 0.10$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	3550	3425.44 (e = -3.5%)	3396.04 (e = -4.3%)	0.116184
Polígono 2	2900	2899.164 (e = -0.03%)	2884.08 (e = -0.54%)	0.170999
Polígono 3	1260	1385.469 (e = 9.9%)	1357.969 (e = 7.7%)	0.255639
(b) $ e_i \leq 0.10$				
Polígono 1	1800	1867.12 (e = 3.73%)	1859.23 (e = 3.29%)	0.321442
Polígono 2	2300	2252.95 (e = -2.04%)	2231.59 (e = -2.95%)	0.325068
Polígono 3	1100	1208.77 (e = 9.89%)	1205.71 (e = 9.61%)	0.258286
Polígono 4	2510	2381.22 (e = -5.13%)	2341.55 (e = -6.71%)	0.495152

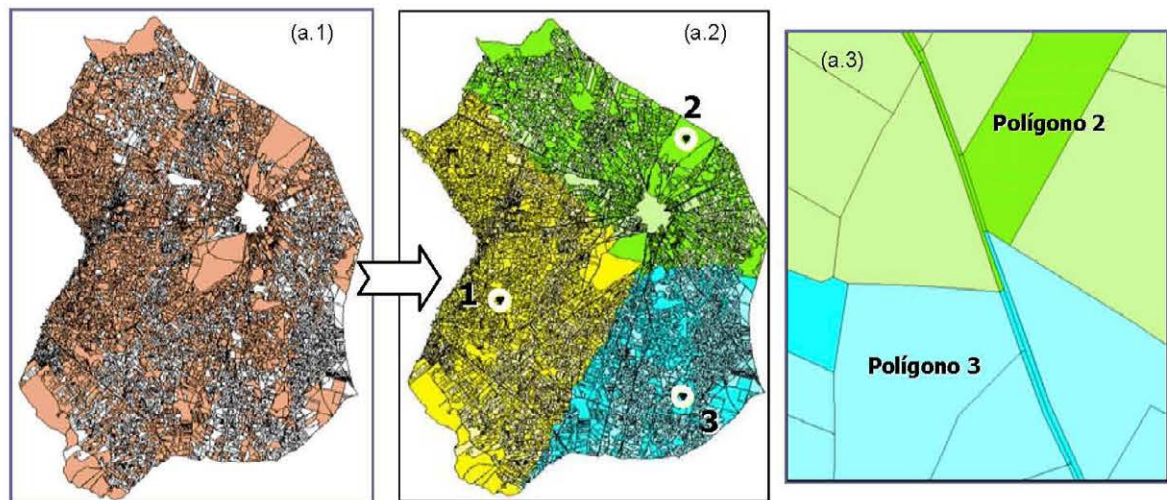


Figura 120. (a.1) Municipio de Lillo (visualización de parcelas transitables con relleno de color). (a.2) Resultado de una partición espacial considerando 3 apriscos ($|e_i| \leq 0.1$). (a.3) Detalle de las parcelas asignadas a los polígonos.

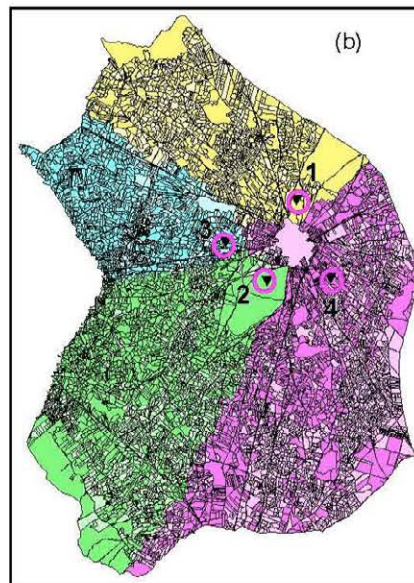


Figura 121. Municipio de Lillo. (b) Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos ($|e_i| \leq 0.1$).



Municipio: El Romeral	$ e_i \leq 0.10$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	850	934.90 (e = 9.99%)	934.27 (e = 9.91%)	0.128386
Polígono 2	1200	1184.54 (e = -1.29%)	1181.79 (e = -1.52%)	0.135183
Polígono 3	1500	1470.36 (e = -1.97%)	1468.39 (e = -2.11%)	0.033506
Polígono 4	1662	1622.98 (e = -2.35%)	1611.81 (e = -3.02%)	0.266502
Polígono 1	700	769.04 (e = 9.86%)	769.04 (e = 9.86%)	0.053115
Polígono 2	800	850.87 (e = 6.36%)	847.49 (e = 5.94%)	0.243345
Polígono 3	1000	936.61 (e = -6.34%)	936.61 (e = -6.34%)	0.059933
Polígono 4	1000	977.44 (e = -2.26%)	967.16 (e = -3.28%)	0.345469
Polígono 5	900	882.50 (e = -1.94%)	880.66 (e = -2.15%)	0.050066
Polígono 6	812	796.33 (e = -1.93%)	795.30 (e = -2.06%)	0.042502

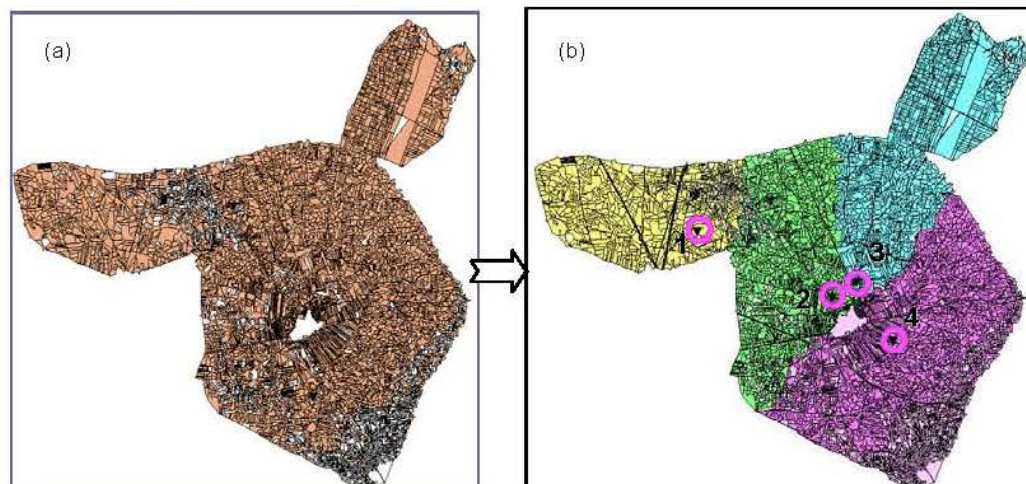


Figura 122. (a) Municipio de El Romeral (visualización de parcelas transitables con relleno de color). (b) Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos ($|e_i| \leq 0.1$).

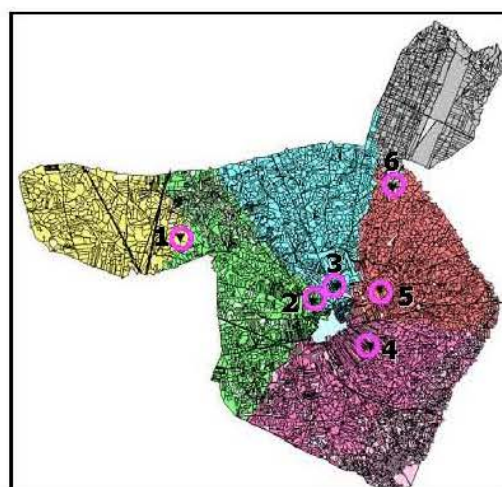


Figura 123. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($|e_i| \leq 0.1$).



A continuación se muestran los resultados obtenidos para una misma partición espacial, antes y después de modificar el umbral de tolerancia del error relativo. En todos los ejemplos, las zonificaciones obtenidas para un $|e_i| \leq 0.05$ son válidas, de forma que el tamaño final de los polígonos de pasto es igual al especificado por el usuario con un margen de error del $\pm 10\%$ de dicho valor.

Municipio: <i>Corral de Almaguer</i>	(a) $ e_i \leq 0.10$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{\text{ajustada}}$	Porosidad
Polígono 1	4500	4308.35 (e = -4.27%)	4227.79 (e = -6.05%)	0.46405893
Polígono 2	6000	6396.90 (e = 6.62%)	6358.13 (e = 5.97%)	0.37249096
Polígono 3	4000	4220.52 (e = 5.51%)	4204.95 (e = 5.12%)	0.31320605
Polígono 4	5089	4663.39 (e = -8.36%)	4432.85 (e = -12.89%)	0.59017200
(b) $ e_i \leq 0.05$				
Polígono 1	4500	4415.01 (e = -1.89%)	4335.49 (e = -3.65%)	0.46170898
Polígono 2	6000	6258.61 (e = 4.31%)	6219.84 (e = 3.66%)	0.37610721
Polígono 3	4000	4079.11 (e = 1.98%)	4063.53 (e = 1.59%)	0.30854599
Polígono 4	5089	4836.43 (e = -4.96%)	4604.85 (e = -9.51%)	0.58313053

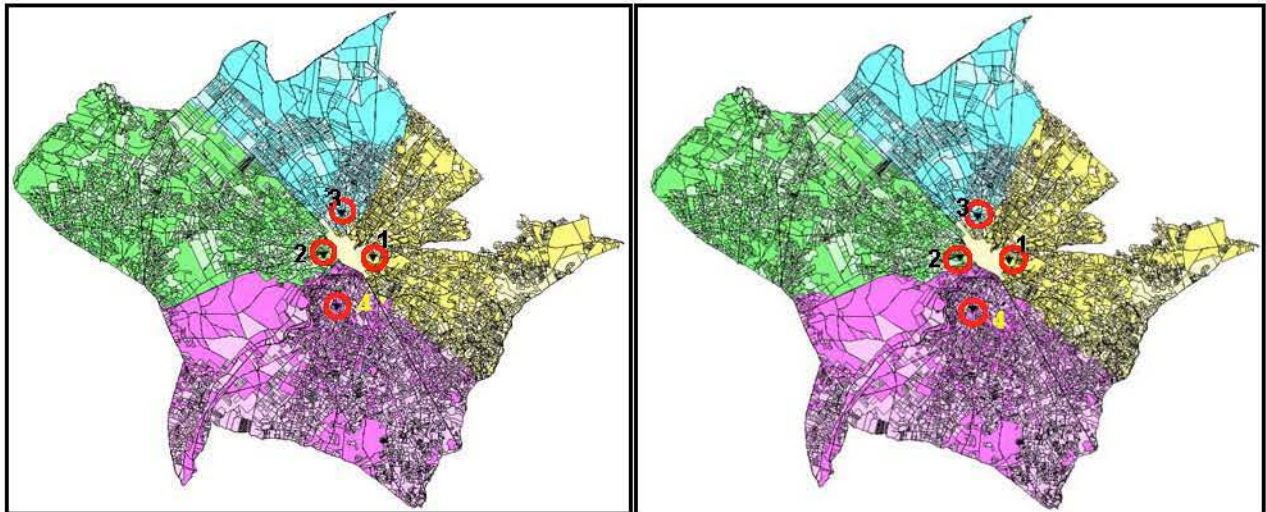


Figura 124. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 4 apriscos y un umbral de tolerancia para el error relativo de: (a) $|e_i| \leq 0.10$ y (b) $|e_i| \leq 0.05$.



Municipio: <i>Corral de Almaguer</i>	(a) $ e_i \leq 0.10$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	4500	4309.38 (e = -4.24%)	4233.48 (e = -5.92%)	0.430867
Polígono 2	3200	3076.17 (e = -3.87%)	3051.61 (e = -4.64%)	0.405965
Polígono 3	2000	2147.23 (e = 7.36%)	2133.21 (e = 6.66%)	0.334506
Polígono 4	5000	4748.06 (e = -5.04%)	4511.89 (e = -9.76%)	0.596641
Polígono 5	4889	5308.32 (e = 8.58%)	5293.54 (e = 8.27%)	0.325881
	(b) $ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	4500	4605.75 (e = 2.35%)	4537.85 (e = 0.84%)	0.40952345
Polígono 2	3200	3173.49 (e = -0.83%)	3138.03 (e = -1.94%)	0.42015421
Polígono 3	2000	1900.40 (e = -4.98%)	1902.04 (e = -4.88%)	0.35639944
Polígono 4	5000	5003.18 (e = 0.06%)	4753.10 (e = -4.94%)	0.58746679
Polígono 5	4889	4906.16 (e = 0.35%)	4892.28 (e = 0.07%)	0.31912924

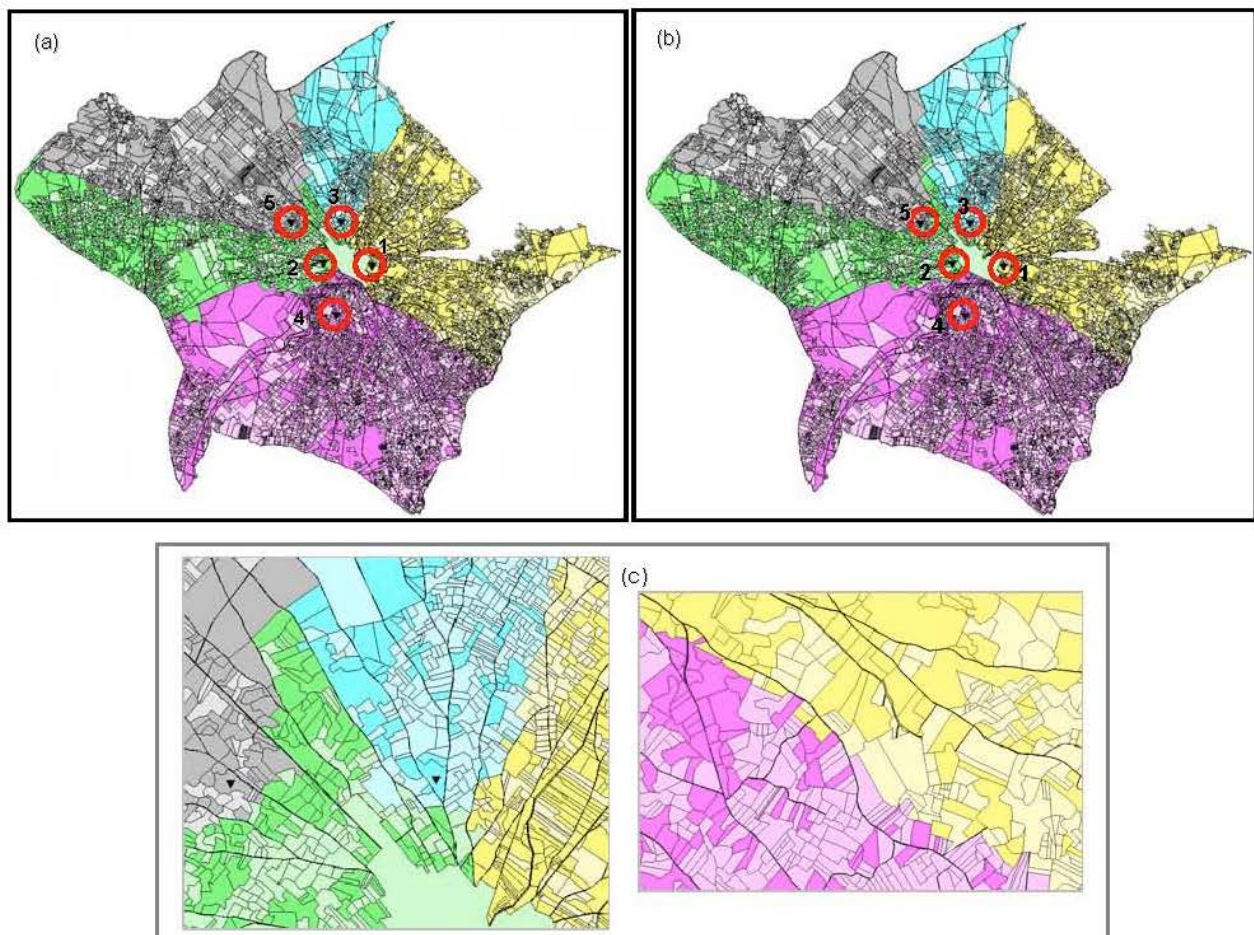


Figura 125. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 5 apriscos y un umbral de tolerancia para el error relativo de: (a) $|e_i| \leq 0.1$ y (b) $|e_i| \leq 0.05$. (c) Ampliación de los bordes entre polígonos de pasto (todas las regiones son conexas).



Municipio: <i>Corral de Almaguer</i>	$ e_i \leq 0.10$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	3500	3326.31 (e = -4.96%)	3288.64 (e = -6.04%)	0.390414
Polígono 2	3100	3324.82 (e = 7.25%)	3300.83 (e = 6.48%)	0.344790
Polígono 3	2000	2063.96 (e = 3.19%)	2051.31 (e = 2.56%)	0.314752
Polígono 4	3200	3152.34 (e = -1.49%)	2974.74 (e = -7.04%)	0.552806
Polígono 5	4500	4737.18 (e = 5.27%)	4722.40 (e = 4.94%)	0.342810
Polígono 6	3289	2984.53 (e = -9.26%)	2885.80 (e = -12.26%)	0.636233

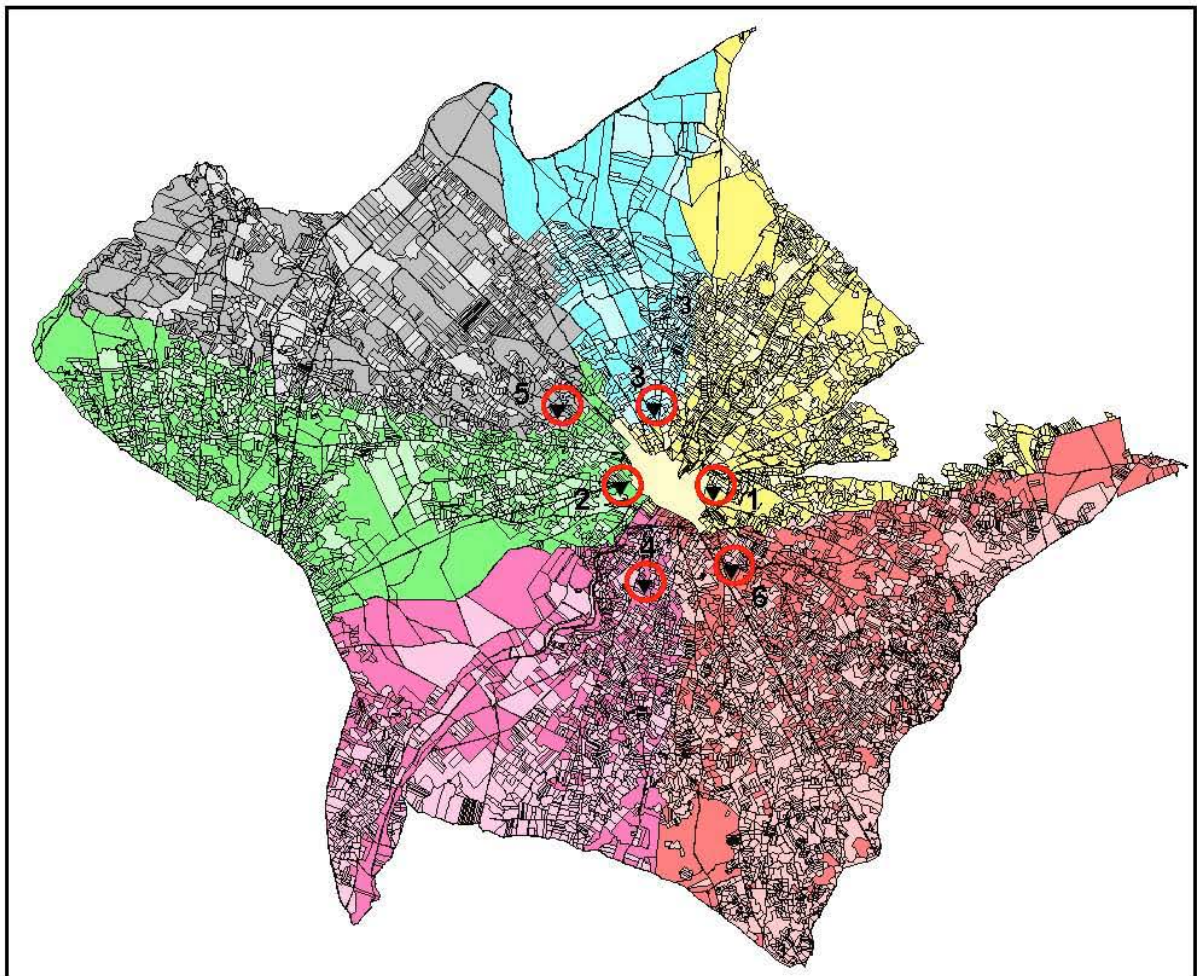


Figura 126. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($|e_i| \leq 0.1$).



Municipio: <i>Corral de Almaguer</i>	$ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	3500	3382.10 (e = -3.37%)	3353.55 (e = -4.18%)	0.38125208
Polígono 2	3100	3240.99 (e = 4.55%)	3216.99 (e = 3.77%)	0.34641819
Polígono 3	2000	2005.69 (e = 0.28%)	1993.04 (e = -0.35%)	0.32165946
Polígono 4	3200	3175.99 (e = -0.75%)	3003.04 (e = -6.15%)	0.54775402
Polígono 5	4500	4653.23 (e = 3.41%)	4638.45 (e = 3.08%)	0.34570347
Polígono 6	3289	3131.15 (e = -4.80%)	3018.64 (e = -8.22%)	0.63276212

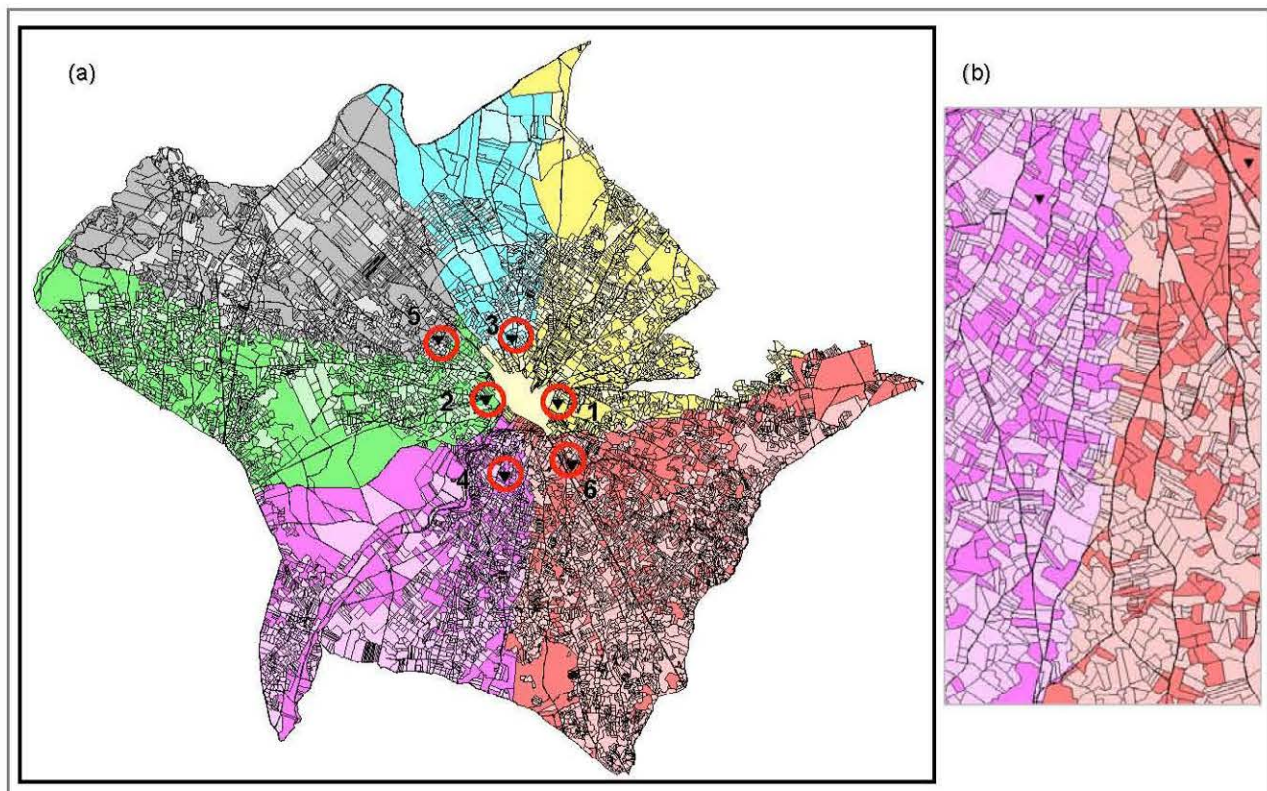


Figura 127. Municipio de Corral de Almaguer. (a) Resultado de una partición espacial considerando 6 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$). (b) Ampliación del borde entre dos polígonos de pasto (todas las regiones son conexas).

Finalmente se muestran algunos de los resultados obtenidos con la versión final de la aplicación desarrollada ($|e_i| \leq 0.05$). En todos los casos el tamaño final de los polígonos de pasto, con respecto al tamaño especificado por el usuario, está comprendido en el rango:

$$0.95 A(z_i) \leq a(z_i) \leq 1.05 A(z_i)$$
$$0.9 A(z_i) \leq a(z_i)^{ajustada} \leq 1.1 A(z_i)$$



Municipio: <i>Lillo</i>	$ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	700	704.85 (e = 0.69%)	704.85 (e = 0.69%)	0.18344072
Polígono 2	900	936.82 (e = 4.09%)	929.23 (e = 3.25%)	0.37500559
Polígono 3	1100	1148.97 (e = 4.45%)	1148.97 (e = 4.45%)	0.24438228
Polígono 4	1700	1634.397 (e = -3.86%)	1619.09 (e = -4.76%)	0.32618237
Polígono 5	850	852.083 (e = 0.24%)	840.30 (e = -1.14%)	0.28154925
Polígono 6	900	895.86 (e = -0.46%)	880.10 (e = -2.21%)	0.55700124
Polígono 7	650	618.12 (e = -4.90%)	603.03 (e = -7.23%)	0.50369082
Polígono 8	500	499.19 (e = -0.16%)	498.90 (e = -0.22%)	0.37072299
Polígono 9	410	419.78 (e = 2.38%)	413.62 (e = 0.88%)	0.49031618

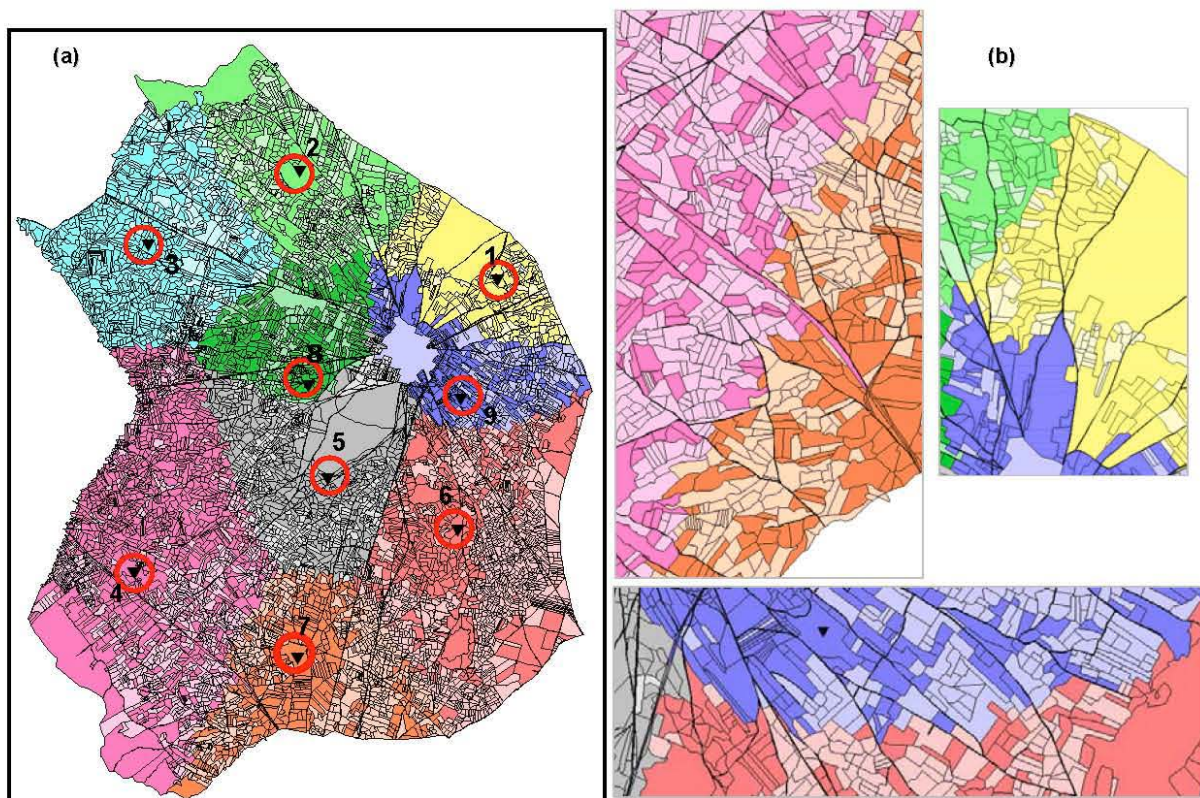


Figura 128. Municipio de Lillo. (a) Resultado de una partición espacial considerando 9 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$). (b) Ampliación del borde entre polígonos de pasto (todas las regiones son conexas).



Municipio: <i>Lillo</i>	$ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)$ ajustada	Porosidad
Polígono 1	560	587.293 (e = 4.87%)	583.121 (e = 4.13%)	0.33390237
Polígono 2	890	917.046 (e = 3.04%)	917.046 (e = 3.04%)	0.2037725
Polígono 3	700	733.585 (e = 4.80%)	732.253 (e = 4.61%)	0.44984283
Polígono 4	900	889.856 (e = -1.13%)	886.192 (e = -1.53%)	0.1770542
Polígono 5	900	889.808 (e = -1.13%)	878.663 (e = -2.37%)	0.32718773
Polígono 6	880	839.695 (e = -4.58%)	824.494 (e = -6.31%)	0.42381323
Polígono 7	450	434.101 (e = -3.53%)	427.209 (e = -5.06%)	0.44841076
Polígono 8	700	683.66 (e = -2.33%)	665.132 (e = -4.98%)	0.58502143
Polígono 9	450	447.879 (e = -0.47%)	442.194 (e = -1.73%)	0.45318049
Polígono 10	640	633.234 (e = -1.06%)	629.812 (e = -1.59%)	0.28552566
Polígono 11	640	653.916 (e = 2.17%)	651.975 (e = 1.87%)	0.36977817

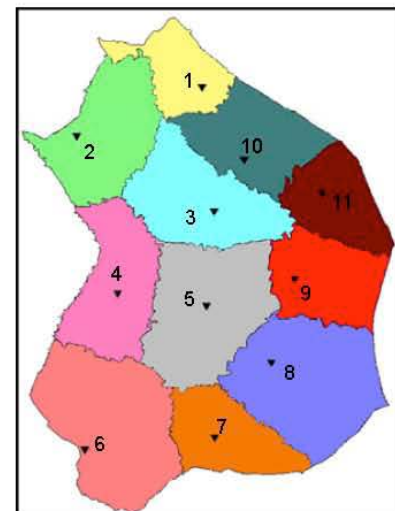
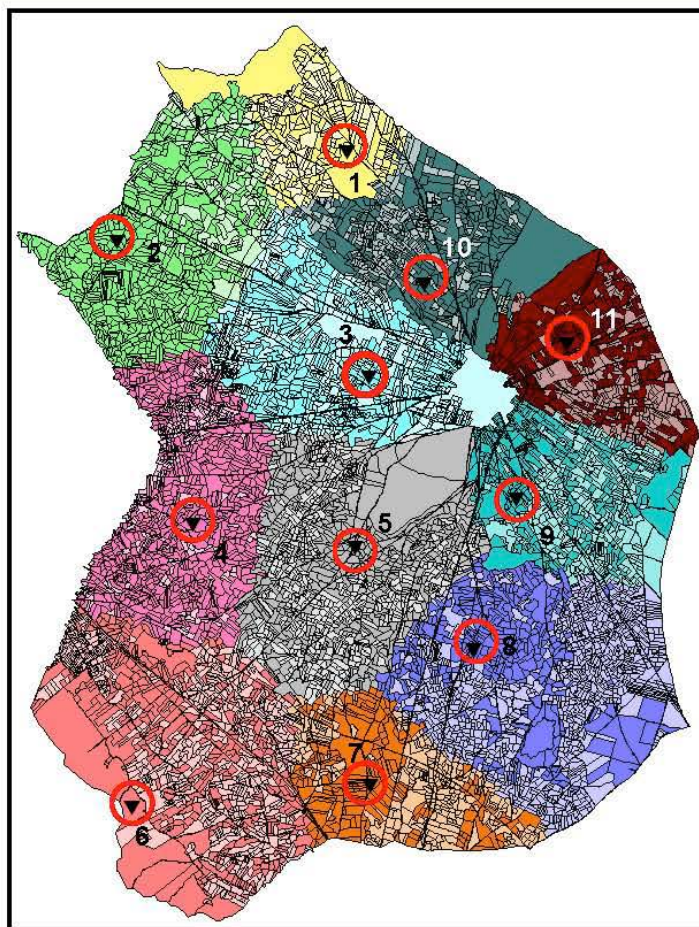


Figura 129. Municipio de Lillo. Resultado de una partición espacial considerando 11 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$).



Municipio: <i>El Romeral</i>	$ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	1050	998.535 (e = -4.90%)	997.039 (e = -5.04%)	0.14674473
Polígono 2	860	866.834 (e = 0.79%)	865.844 (e = 0.68%)	0.02993633
Polígono 3	690	720.094 (e = 4.36%)	719.066 (e = 4.21%)	0.04571078
Polígono 4	935	942.636 (e = 0.82%)	941.694 (e = 0.72%)	0.04372878
Polígono 5	610	610.458 (e = 0.08 %)	609.567 (e = -0.07%)	0.16371617
Polígono 6	420	423.065 (e = 0.73%)	419.963 (e = -0.01%)	0.33340464
Polígono 7	647	651.164 (e = 0.65%)	643.098 (e = -0.60%)	0.35674379

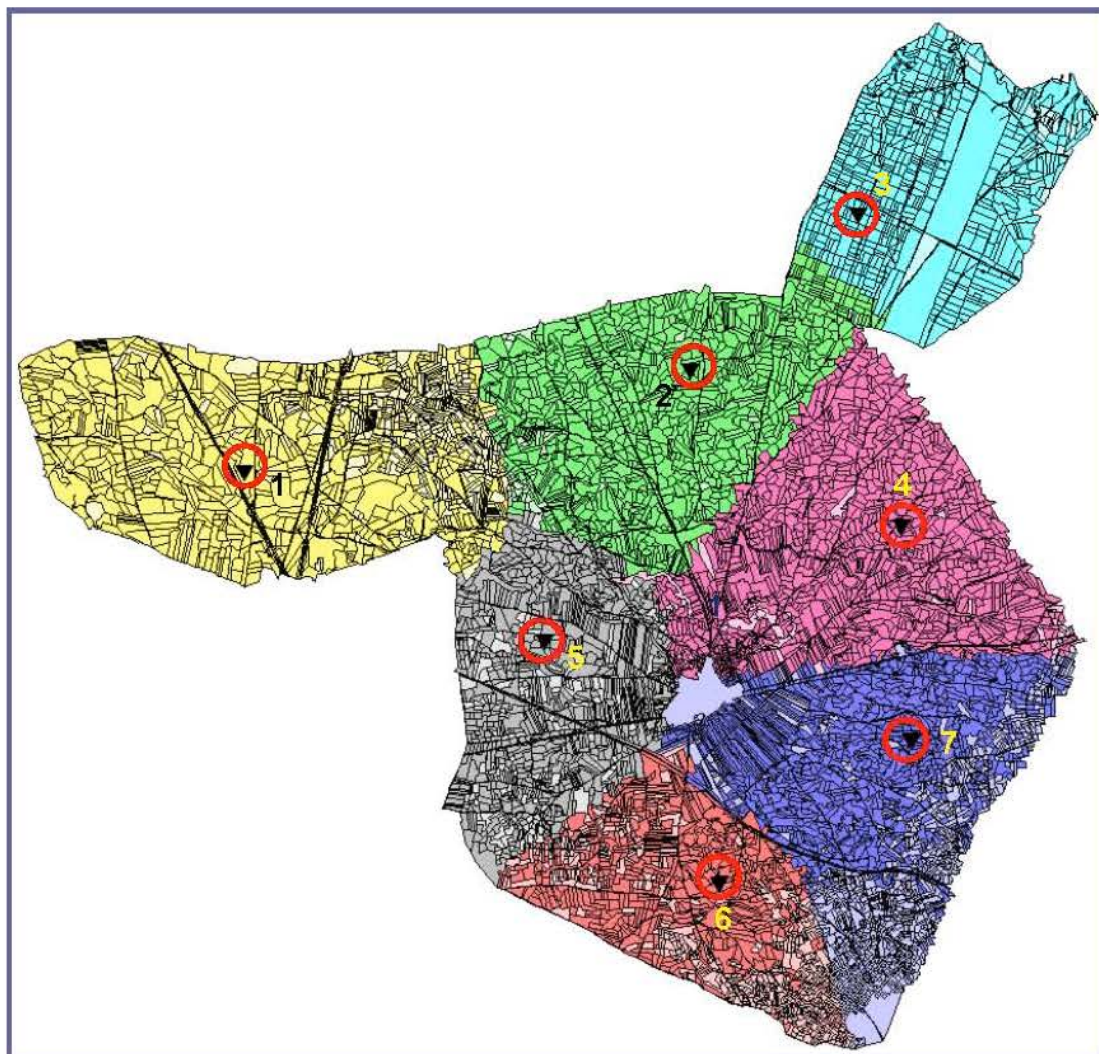


Figura 130. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 7 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$).



Municipio: <i>El Romeral</i>	$ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	390	383.071 (e = -1.78%)	382.129 (e = -2.02%)	0.05948019
Polígono 2	250	245.07 (e = -1.97%)	245.07 (e = -1.97%)	0.05422431
Polígono 3	380	372.002 (e = -2.10%)	371.307 (e = -2.29%)	0.21683468
Polígono 4	410	391.419 (e = -4.53%)	391.128 (e = -4.60%)	0.22307861
Polígono 5	340	324.908 (e = -4.44%)	316.748 (e = -6.84%)	0.45229707
Polígono 6	440	425.571 (e = -3.28%)	423.553 (e = -3.74%)	0.31894372
Polígono 7	530	517.594 (e = -2.34%)	516.699 (e = -2.51%)	0.0461011
Polígono 8	1172	1205.082 (e = 2.82%)	1204.054 (e = 2.73%)	0.02840205
Polígono 9	1300	1348.069 (e = 3.70%)	1345.583 (e = 3.51%)	0.12376186

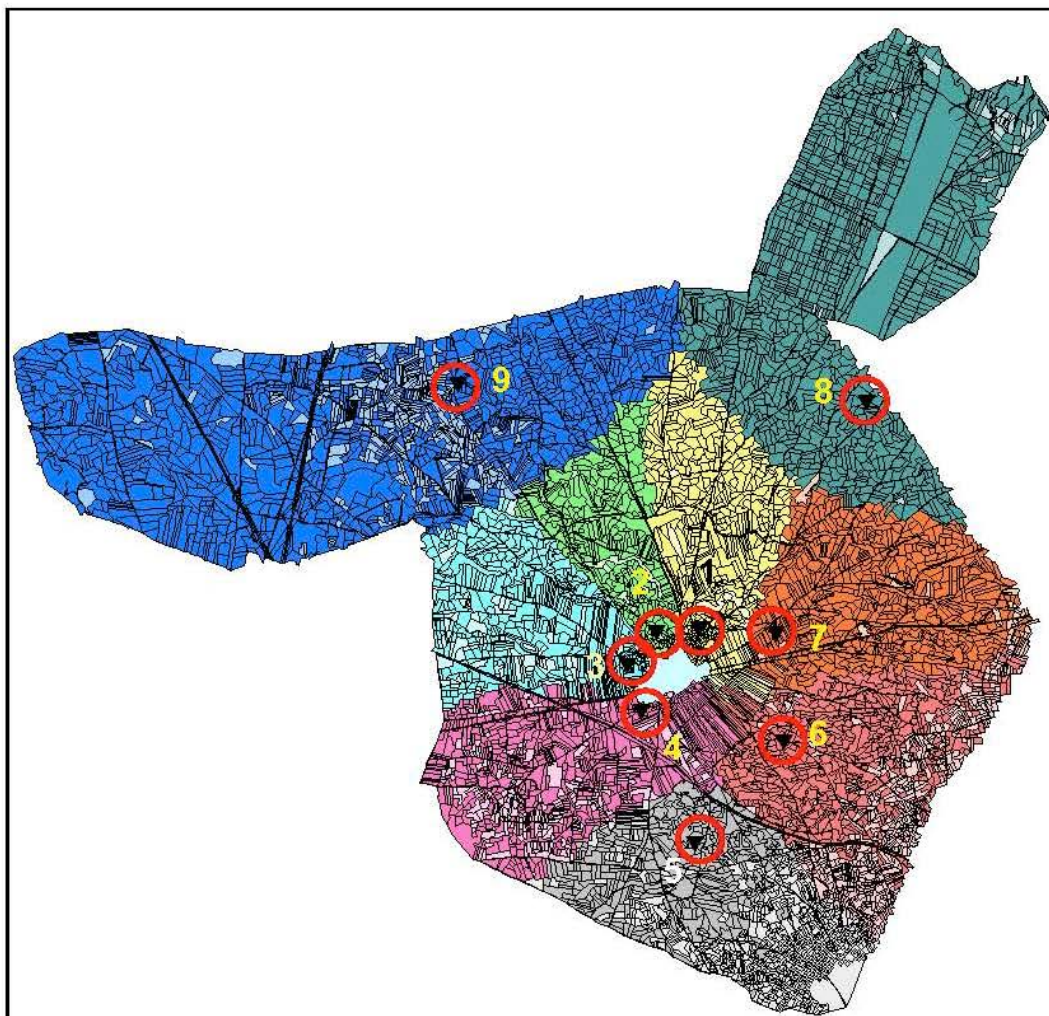


Figura 131. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 9 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$).



Municipio: <i>El Romeral</i>	$ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	250	250.809 (e = 0.32%)	250.809 (e = 0.32%)	0.02199643
Polígono 2	320	320.877 (e = 0.27%)	320.877 (e = 0.27%)	0.10739195
Polígono 3	290	288.027 (e = -0.68%)	288.027 (e = -0.68%)	0.01034555
Polígono 4	440	439.29 (e = -0.16%)	439.29 (e = -0.16%)	0.02320431
Polígono 5	140	142.123 (e = 1.52%)	142.123 (e = 1.52%)	0
Polígono 6	145	144.896 (e = -0.07%)	144.896 (e = -0.07%)	0.02369618
Polígono 7	160	159.767 (e = -0.15%)	158.872 (e = -0.71%)	0.09661935
Polígono 8	330	330.112 (e = 0.03%)	330.112 (e = 0.03%)	0.03963278
Polígono 9	250	249.611 (e = -0.16%)	249.611 (e = -0.16%)	0.13927032
Polígono 10	320	320.148 (e = 0.05%)	319.952 (e = -0.02%)	0.24136058
Polígono 11	110	108.235 (e = -1.60%)	108.235 (e = -1.60%)	0.06884041
Polígono 12	600	601.686 (e = 0.28%)	600.649 (e = 0.11%)	0.14250543
Polígono 13	170	170.051 (e = 0.03%)	168.109 (e = -1.11%)	0.39663204
Polígono 14	200	199.871 (e = -0.06%)	195.648 (e = -2.18%)	0.47929012
Polígono 15	190	189.749 (e = -0.13%)	189.749 (e = -0.13%)	0.0112032
Polígono 16	260	258.982 (e = -0.39%)	258.287 (e = -0.66%)	0.16039881
Polígono 17	300	299.117 (e = -0.29%)	299.117 (e = -0.29%)	0.0017067
Polígono 18	150	148.767 (e = -0.82%)	144.754 (e = -3.50%)	0.49545204
Polígono 19	140	141.262 (e = 0.90%)	140.234 (e = 0.17%)	0.10018234
Polígono 20	447	449.406 (e = 0.54%)	446.92 (e = -0.02%)	0.21781638

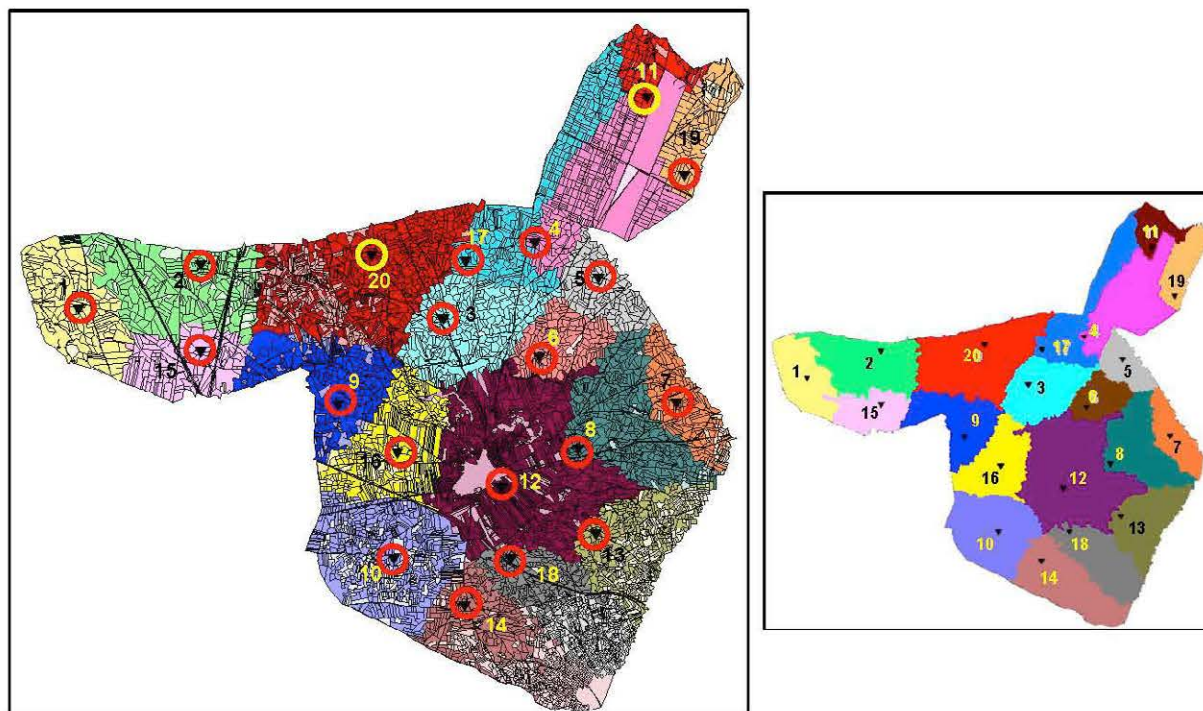


Figura 132. Municipio de El Romeral. Resultado de una partición espacial considerando 20 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$).



Municipio: <i>Corral de Almaguer</i>	$ e_i \leq 0.05$			
	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	2210	2235.557 (e = 1.16%)	2232.062 (e = 0.10%)	0.28337142
Polígono 2	1580	1527.454 (e = -3.33%)	1527.454 (e = -3.33%)	0.20489691
Polígono 3	1700	1666.474 (e = -1.97%)	1666.474 (e = -1.97%)	0.24294927
Polígono 4	1040	1091.462 (e = 4.95%)	1068.722 (e = 2.76%)	0.42322614
Polígono 5	1625	1663.475 (e = 2.37%)	1630.202 (e = 0.32%)	0.48531253
Polígono 6	1350	1365.398 (e = 1.14%)	1272.441 (e = -5.75%)	0.72517253
Polígono 7	1670	1718.896 (e = 2.93%)	1559.904 (e = -6.59%)	0.60486805
Polígono 8	1935	1914.981 (e = -1.03%)	1890.102 (e = -2.32%)	0.43188529
Polígono 9	1640	1659.383 (e = 1.18%)	1636.441 (e = -0.22%)	0.51023085
Polígono 10	1710	1706.144 (e = -0.23%)	1701.641 (e = -0.49%)	0.37808039
Polígono 11	1689	1607.393 (e = -4.83%)	1607.393 (e = -4.80%)	0.1785657
Polígono 12	1440	1432.539 (e = -0.52%)	1430.887 (e = -0.63%)	0.37957568

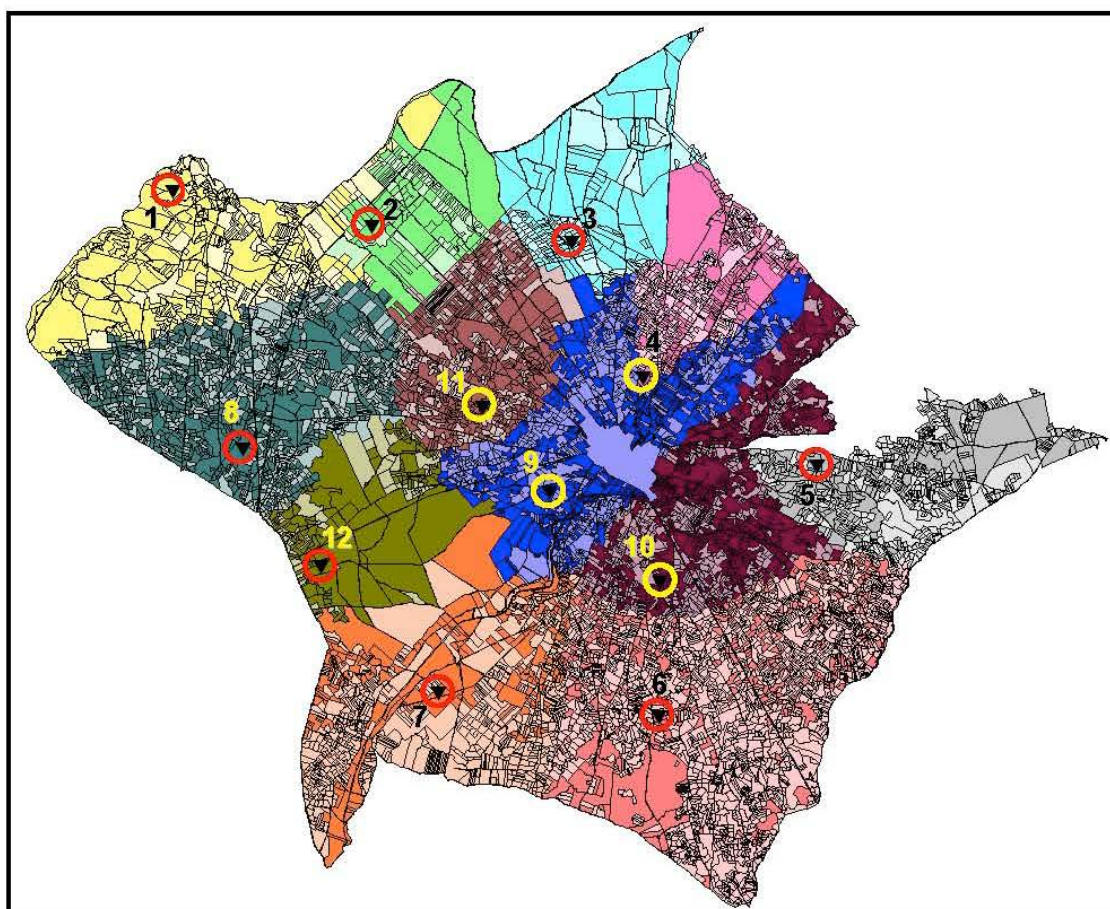


Figura 133. Municipio de Corral de Almaguer. Resultado de una partición espacial considerando 12 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$).



4.3.1 Discusión de resultados

Los resultados de la sección anterior muestran algunas zonificaciones con una distribución concéntrica de los apriscos alrededor de los núcleos de población. Este tipo de configuración espacial se aproxima a la que actualmente existe en los municipios del área de estudio y se caracteriza por una serie de problemas que justificarían, si fuera posible, el cambio de ubicación de los apriscos a otros lugares que mejoraran la eficiencia del sistema agropecuario.

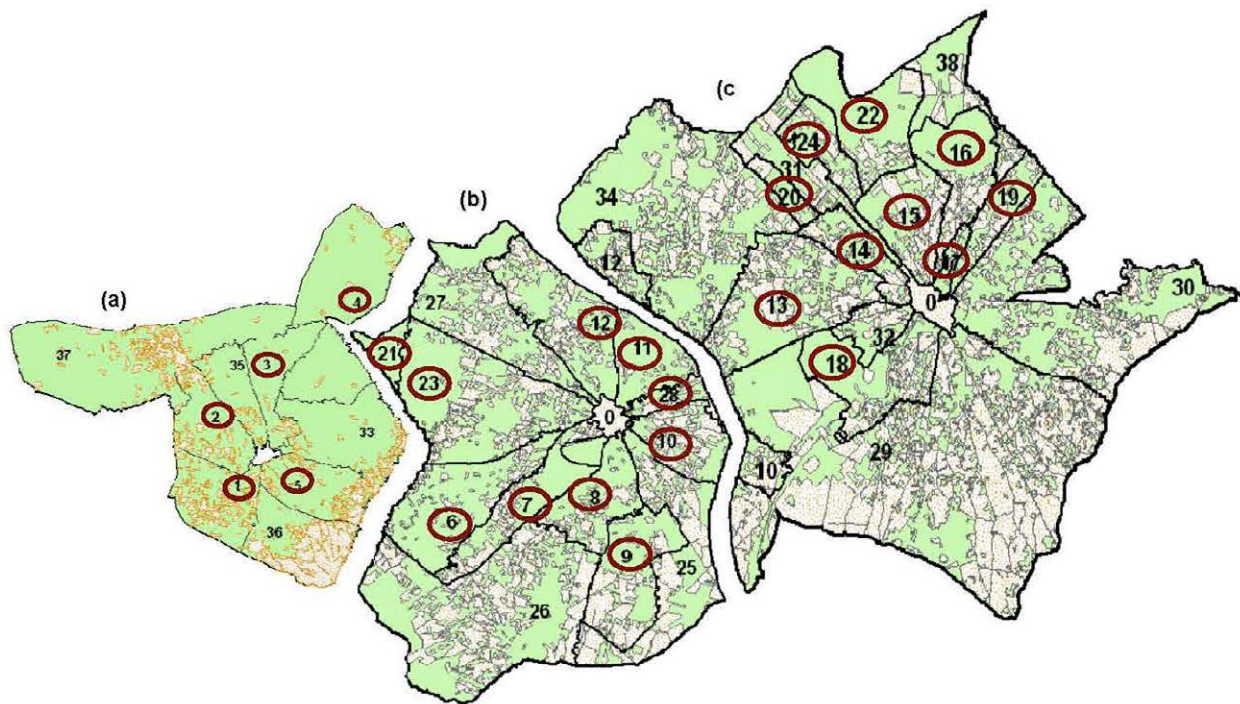


Figura 134. Polígonos de pasto en los municipios del área de estudio en 1999 (El Romeral (a), Lillo (b) y Corral de Almaguer (c)). Los polígonos marcados con un círculo rojo son los que están en uso desde el año 2004.

Aunque la aplicación es capaz de generar las zonificaciones correspondientes a este tipo de distribuciones, hay que destacar que, tal y como figura en la sección 3.4.4.2 (“Debilidades del modelo de solución”), el algoritmo que se ha diseñado no encuentra siempre una solución al problema de partición espacial. Algunos de los casos detectados responden a configuraciones concéntricas de los generadores, para las que no se crea una zonificación que verifique las condiciones de tamaño y tolerancia de cada región. A continuación se presentan tres ejemplos de este problema, uno por cada municipio del área de estudio. En estos casos, la distribución de apriscos y el tamaño elegido para los polígonos generan zonificaciones no válidas, ya que algunas de las regiones tienen un error relativo $|e_i| > 0.05$ y una superficie forrajera final, $a(z_i)^{ajustada}$, que no verifica la condición $0.9A(z_i) \leq a(z_i)^{ajustada} \leq 1.1A(z_i)$.



Municipio: Lillo	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	180	179.986 (e = -0.01%)	179.986 (e = -0.01%)	0.01523979
Polígono 2	900	899.782 (e = -0.02%)	899.488 (e = -0.06%)	0.29494243
Polígono 3	630	624.099 (e = -0.94%)	622.207 (e = -1.24%)	0.41908545
Polígono 4	650	657.15 (e = 1.10%)	652.406 (e = 0.37%)	0.32137431
Polígono 5	600	632.676 (e = 5.45%)	631.718 (e = 5.29%)	0.12586963
Polígono 6	210	176.338 (e = -16.03%)	176.338 (e = -16.03%)	0.19096811
Polígono 7	420	409.304 (e = -2.55%)	402.108 (e = -4.26%)	0.53914869
Polígono 8	860	870.819 (e = 1.26%)	850.257 (e = -1.13%)	0.56654905
Polígono 9	660	660.098 (e = 0.01%)	649.851 (e = -1.54%)	0.3693881
Polígono 10	800	799.002 (e = -0.12%)	795.338 (e = -0.58%)	0.19381809
Polígono 11	1100	1099.694 (e = -0.03%)	1078.461 (e = -1.96%)	0.42199644
Polígono 12	700	701.125 (e = 0.16%)	699.933 (e = -0.01%)	0.30072009

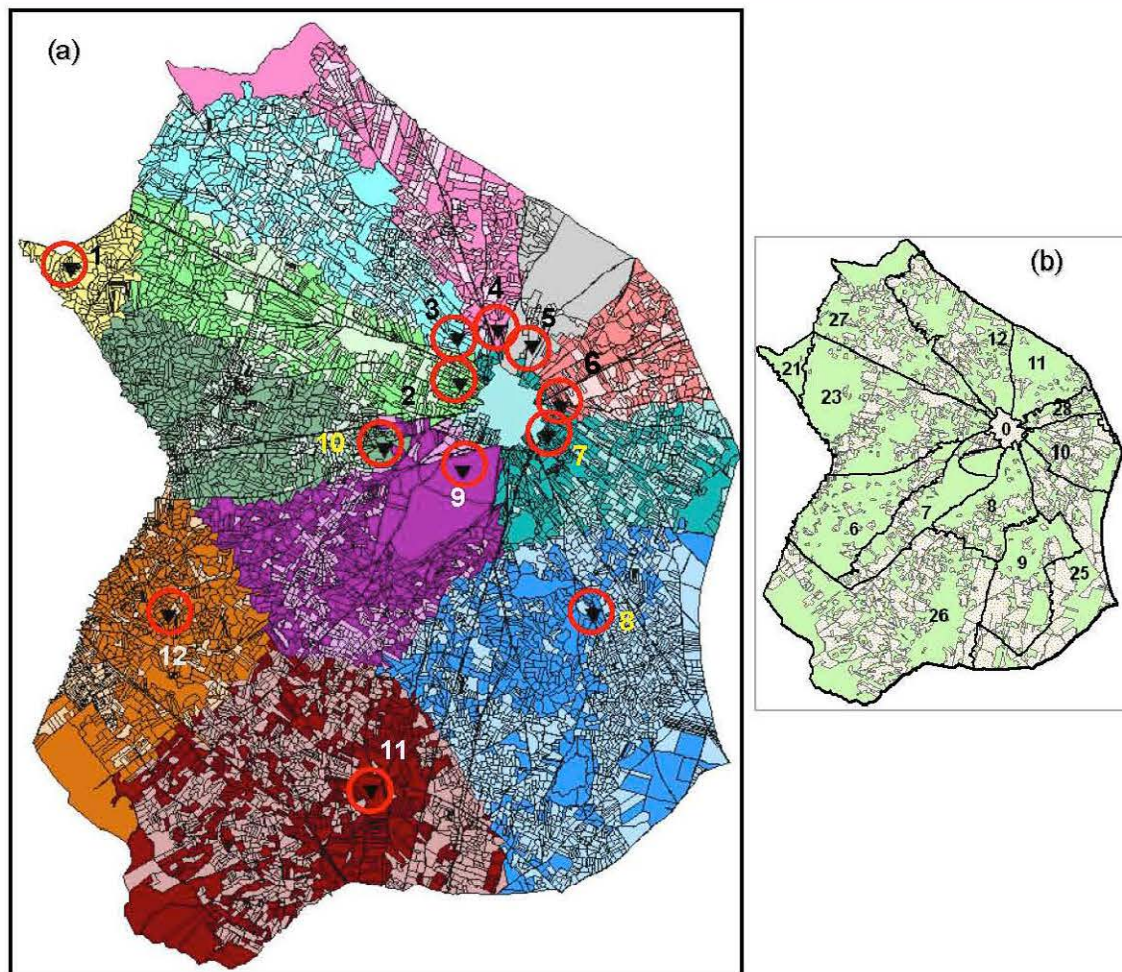


Figura 135. Municipio de Lillo. (a) Resultado de una partición espacial no válida considerando 12 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$). (b) Partición existente en el municipio en 1999 (realizada manualmente sobre cartografía analógica).



Municipio: El Romeral (I)	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	430	520.368 (e = 21.02%)	519.42 (e = 20.80%)	0.02618366
Polígono 2	390	306.534 (e = -21.40%)	306.534 (e = -21.40%)	0.0667341
Polígono 3	495	494.983 (e = -0.01%)	492.497 (e = -0.51%)	0.16296879
Polígono 4	410	410.385 (e = 0.09%)	409.399 (e = -0.15%)	0.27041813
Polígono 5	430	429.467 (e = -0.12%)	421.231 (e = -2.04%)	0.45451663
Polígono 6	560	560.368 (e = 0.07%)	557.531 (e = -0.44%)	0.22945849
Polígono 7	700	695.036 (e = -0.71%)	695.036 (e = -0.71%)	0.02644106
Polígono 8	980	979.755 (e = -0.02%)	978.727 (e = -0.13%)	0.03419752
Polígono 9	817	815.89 (e = -0.14%)	815.89 (e = -0.14%)	0.11753751

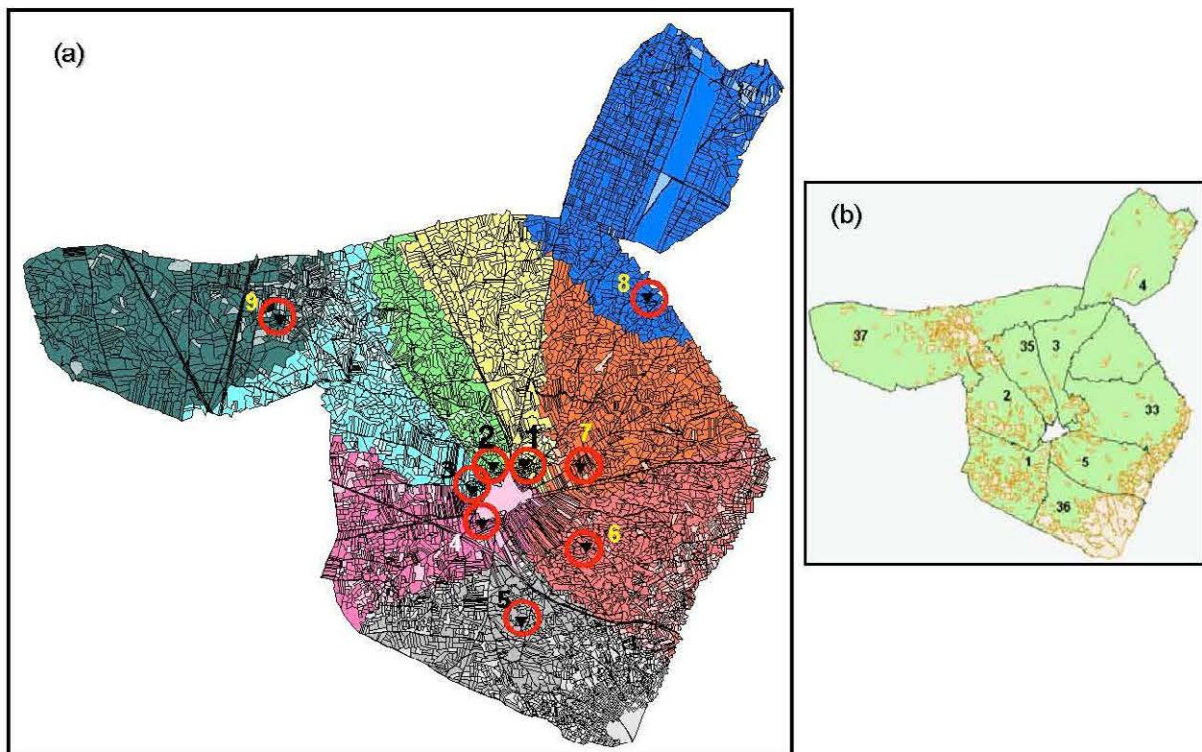


Figura 136. Municipio de El Romeral (I). (a) Resultado de una partición espacial no válida considerando 9 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$). (b) Partición existente en el municipio en 1999 (realizada manualmente sobre cartografía analógica).



Si en este ejemplo se modifican, por un lado, los tamaños de las regiones y, por otro, la posición de los apriscos 5, 6 y 9 (véase tabla 50), se obtiene una zonificación que, aunque también presenta dos polígonos no válidos, sus errores son inferiores a los de esta solución: de los valores -21.4% y 21.02% en los polígonos 2 y 1, se pasa a 15.48% y -10.23% en los polígonos 2 y 3, respectivamente. Este hecho pone de manifiesto que un usuario de la aplicación podría ajustar una zonificación próxima a una solución correcta, introduciendo cambios en los tamaños de las regiones y pequeños desplazamientos en las ubicaciones de los apriscos, de forma que las zonificaciones posteriores cumplieran los criterios de entrada.

	El Romeral (15496 parcelas)								
	Polígonos								
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
Errores (e_i) (partición I))	20.80%	-21.40%	-0.51%	-0.15%	-2.04%	-0.44%	-0.71%	-0.13%	-0.14%
Cambios en tamaño (FAE%)	-9.3%	-28.2%	-19.2%	12.2%	-32.5%	-28.6%	-14.3%	27.5%	39.8%
Cambios en X (m)					-1023	-1047			1206
Cambios en Y(m)					-248	518			619
Errores (e_i) (partición II))	-3.16%	15.48%	-10.23%	0.13%	-1.45%	-1.41%	-0.27%	-0.04%	0.49%

Tabla 50. Variación de los errores de una partición tras introducir cambios en la posición de los generadores y en los tamaños de las zonas.



Municipio: El Romeral (II)	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	390	378.612 (e = -2.92%)	377.67 (e = -3.16%)	0.04547426
Polígono 2	280	323.349 (e = 15.48%)	323.349 (e = 15.48%)	0.04889161
Polígono 3	400	360.075 (e = -9.98%)	359.085 (e = -10.23%)	0.12372878
Polígono 4	460	461.583 (e = 0.34%)	460.597 (e = 0.13%)	0.25618837
Polígono 5	290	290.023 (e = 0.01%)	285.80 (e = -1.45%)	0.44679366
Polígono 6	400	400.320 (e = 0.08%)	394.365 (e = -1.41%)	0.36506892
Polígono 7	600	599.280 (e = -0.12%)	598.385 (e = -0.27%)	0.08142397
Polígono 8	1250	1250.533 (e = 0.04 %)	1249.505 (e = -0.04%)	0.0301209
Polígono 9	1142	1149.011 (e = 0.61%)	1147.515 (e = 0.49%)	0.12681265

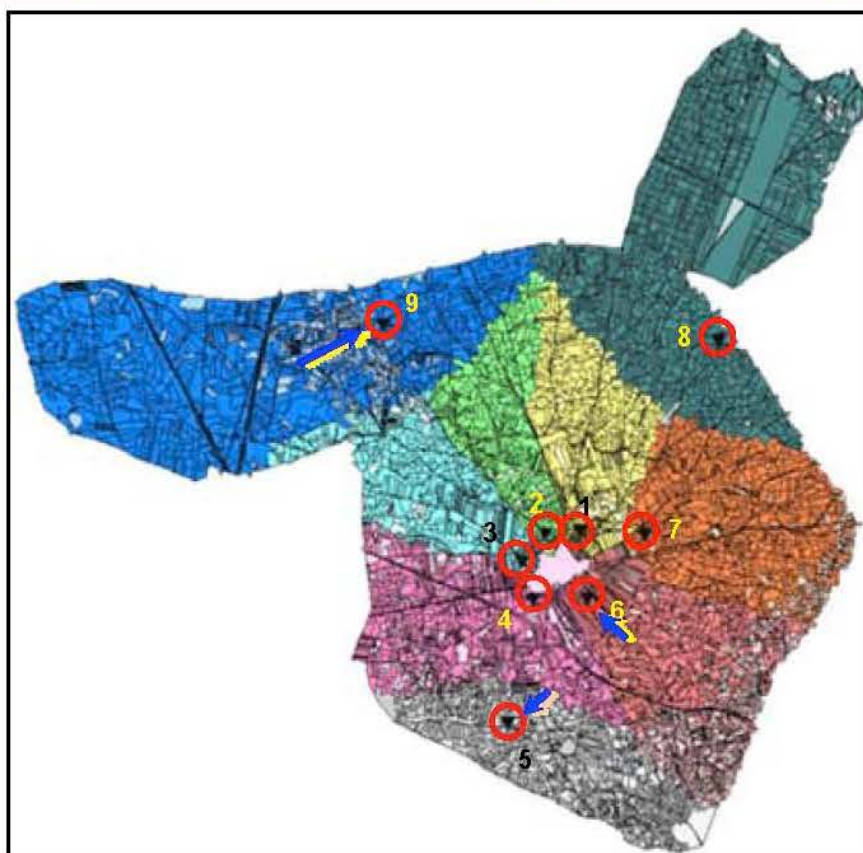


Figura 137. Municipio de El Romeral (II). Resultado de una partición no válida considerando 9 apriscos ($|e| \leq 0.05$).

En el siguiente caso también se ha obtenido una zonificación no válida con errores que, en algunos polígonos, se aproximan al 50% del tamaño especificado por el usuario. Con el objetivo de mejorar este resultado se ha realizado una segunda partición, modificando los valores de FAE en 14 de los 17 polígonos de pasto. Aunque el resultado sigue sin ajustarse a los criterios establecidos, los errores relativos de los polígonos 9, 7, 2 y 13 se reducen considerablemente, pasando de -48.46%, 28.75%, -19.33% y 18.62% a 28.35%, 8.58%, -11.26% y -6.22% respectivamente.



Municipio: Corral de	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	180	179.28 (e = -0.4%)	176.979 (e = -1.68%)	0.34567642
Polígono 2	1650	1341.714 (e = -18.68%)	1331.06 (e = -19.33%)	0.40201249
Polígono 3	390	383.29 (e = -1.72%)	381.15 (e = -2.27%)	0.5323416
Polígono 4	800	695.508 (e = -13.06%)	690.172 (e = -13.73%)	0.4275812
Polígono 5	870	820.706 (e = -5.67%)	807.054 (e = -7.23%)	0.50882102
Polígono 6	170	169.509 (e = -0.29%)	169.509 (e = -0.29%)	0.6558349
Polígono 7	1100	1556.60 (e = 41.51%)	1415.92 (e = 28.72%)	0.37567527
Polígono 8	300	319.953 (e = 6.65%)	315.863 (e = 5.29%)	0.35924615
Polígono 9	380	195.866 (e = -48.46%)	195.866 (e = -48.46%)	0.04753903
Polígono 10	1270	1251.843 (e = -1.43%)	1251.843 (e = -1.43%)	0.08305547
Polígono 11	3090	2884.864 (e = -6.64%)	2781.771 (e = -9.97%)	0.67668768
Polígono 12	3350	3328.3 (e = -0.65%)	3268.489 (e = -2.43%)	0.40832511
Polígono 13	570	676.152 (e = 18.62%)	676.15 (e = 18.62%)	0.30993492
Polígono 14	400	455.994 (e = 13.99%)	448.41 (e = 12.10%)	0.24227074
Polígono 15	3750	3930.6 (e = 4.82%)	3914.51 (e = 4.39%)	0.34112022
Polígono 16	990	1044.382 (e = 5.49%)	1044.38 (e = 5.49%)	0.29449138
Polígono 17	329	354.594 (e = 7.78%)	354.594 (e = 7.78%)	0.26862831

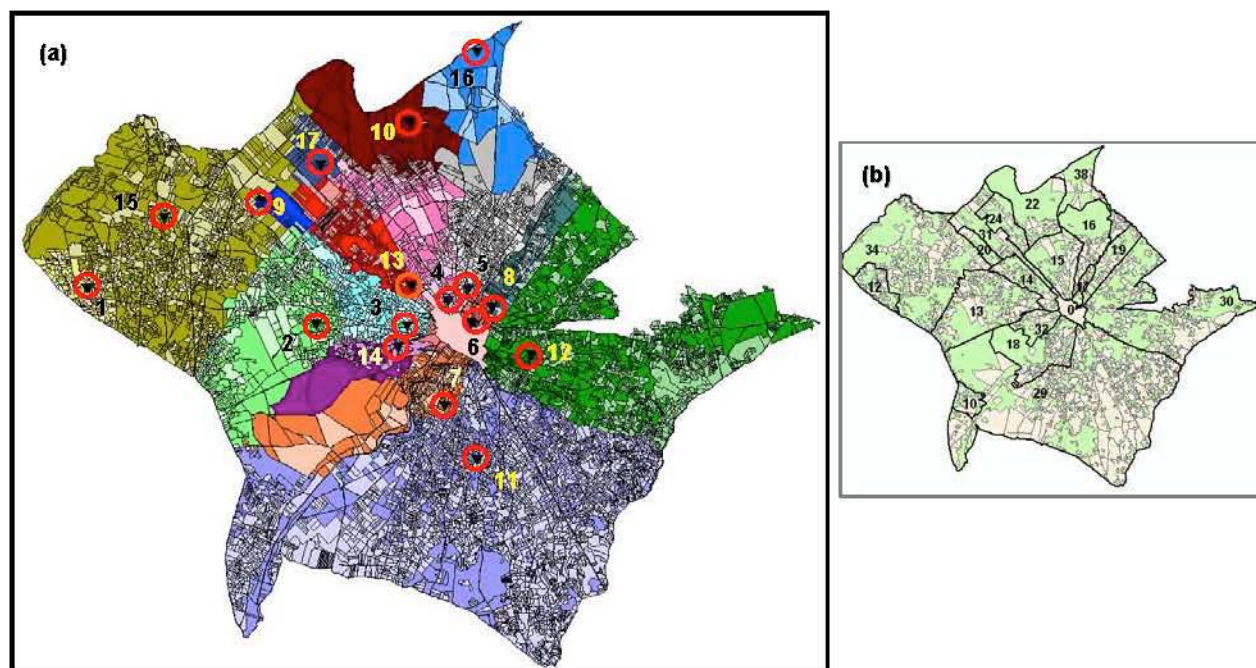


Figura 138. Municipio de Corral de Almaguer (I). (a) Resultado de una partición espacial no válida de 17 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$). (b) Partición existente en el municipio en 1999 (realizada manualmente sobre cartografía analógica).



Municipio: Corral de Almaguer	$A(z_i)$	$a(z_i)$	$a(z_i)^{ajustada}$	Porosidad
Polígono 1	200	200.632 (e = 0.32%)	198.331 (e = -0.83%)	0.34892169
Polígono 2	1800	1610.58 (e = -10.52%)	1597.28 (e = -11.26%)	0.38889952
Polígono 3	380	382.419 (e = 0.64%)	380.279 (e = 0.07%)	0.5334243
Polígono 4	700	763.195 (e = 9.03%)	757.859 (e = 8.27%)	0.3862019
Polígono 5	830	802.343 (e = -3.33%)	788.691 (e = -4.98%)	0.5199911
Polígono 6	170	170.004 (e = 0.002%)	170.004 (e = 0.002%)	0.6576333
Polígono 7	1300	1552.18 (e = 19.40%)	1411.502 (e = 8.58%)	0.37516164
Polígono 8	300	298.206 (e = -0.60%)	292.882 (e = -2.37%)	0.40655412
Polígono 9	350	449.228 (e = 28.35%)	449.228 (e = 28.35%)	0.25071424
Polígono 10	1420	1406.118 (e = -0.98%)	1406.118 (e = -0.98%)	0.08987611
Polígono 11	3100	2900.601 (e = -6.43%)	2797.059 (e = -9.77%)	0.6760759
Polígono 12	3300	3299.533 (e = -0.01%)	3241.405 (e = -1.77%)	0.40576634
Polígono 13	609	571.10 (e = -6.22%)	571.10 (e = -6.22%)	0.32943838
Polígono 14	400	455.994 (e = 13.99%)	448.408 (e = 12.10%)	0.24227074
Polígono 15	3190	3248.676 (e = 1.84%)	3235.233 (e = 1.42%)	0.33322423
Polígono 16	990	1003.538 (e = 1.37%)	1003.538 (e = 1.37%)	0.30877914
Polígono 17	550	474.806 (e = -13.67%)	474.806 (e = -13.67%)	0.37697348

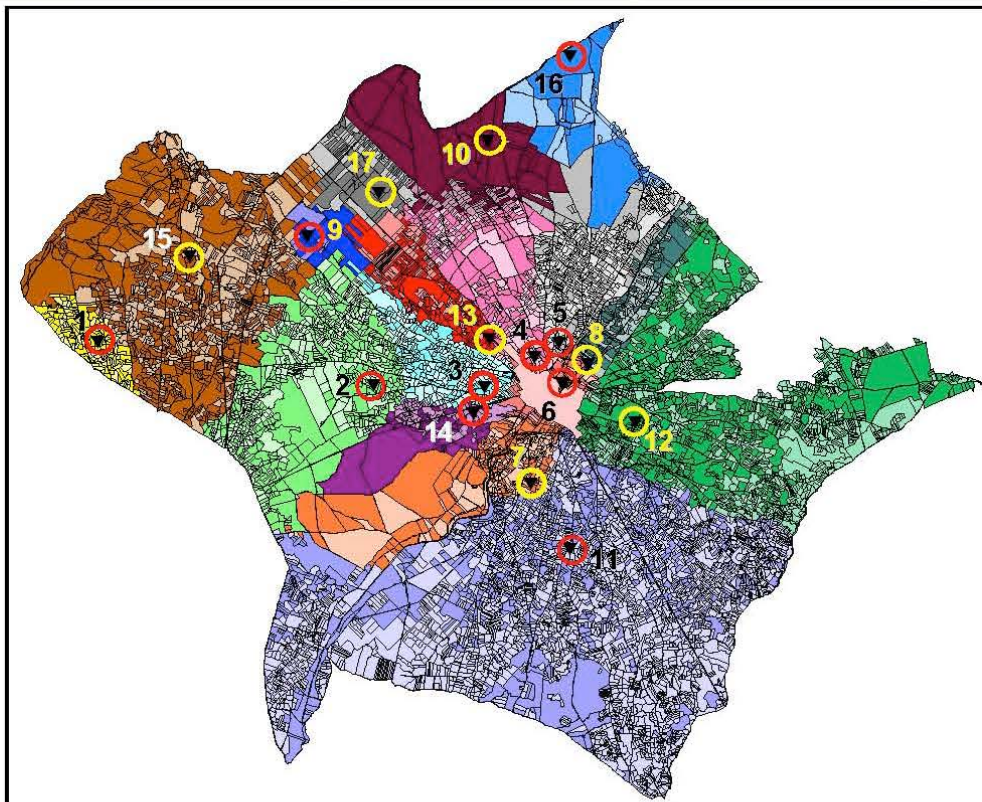


Figura 139. Municipio de Corral de Almaguer (II). Resultado de una partición no válida de 17 apriscos ($|e_i| \leq 0.05$).



La ubicación de los apriscos en los sistemas extensivos del tipo cereal-ovino es uno de los factores que determina restrictivamente la infraestructura ganadera. En el año 2004 hasta el 56% de los ganaderos tenían sus apriscos en localizaciones próximas a los núcleos de población (Caballero et al. 2004). Esta configuración espacial es extremadamente ineficiente ya que los polígonos tienden a formarse como sectores circulares con el núcleo en el centro. En estos casos, los desplazamientos de los rebaños son más largos y costosos, siendo necesaria la presencia continua de los pastores para guiar a los animales hasta las parcelas con aprovechamiento forrajero. Las necesidades de alimentación de los animales crecen según aumenta el gasto energético correspondiente a las distancias recorridas, por lo que el balance coste-beneficio puede llegar a ser negativo.

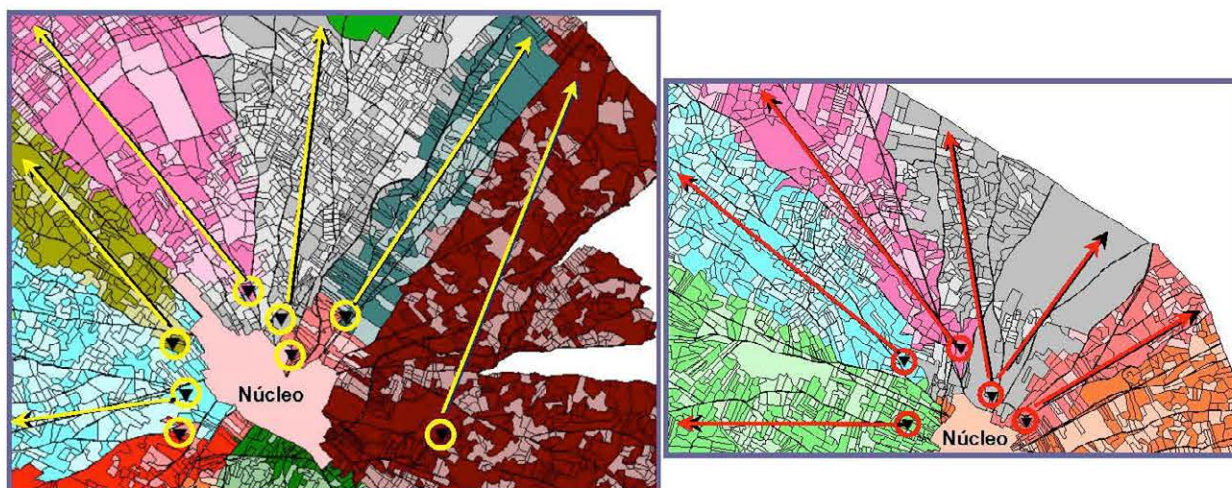


Figura 140. Polígonos de pasto correspondientes a apriscos situados en las proximidades del núcleo de población.

Para mejorar la eficiencia energética de estos sistemas sería conveniente cambiar la ubicación de los apriscos, trasladando sus localizaciones de las proximidades de los núcleos de población a puntos del interior de los polígonos. En el siguiente gráfico puede observarse el efecto conseguido y cómo se reduce la longitud de los desplazamientos a las zonas de pasto. No obstante, la estructura socio-económica actual de los municipios del área de estudio es un obstáculo para que se puedan realizar este tipo de cambios.

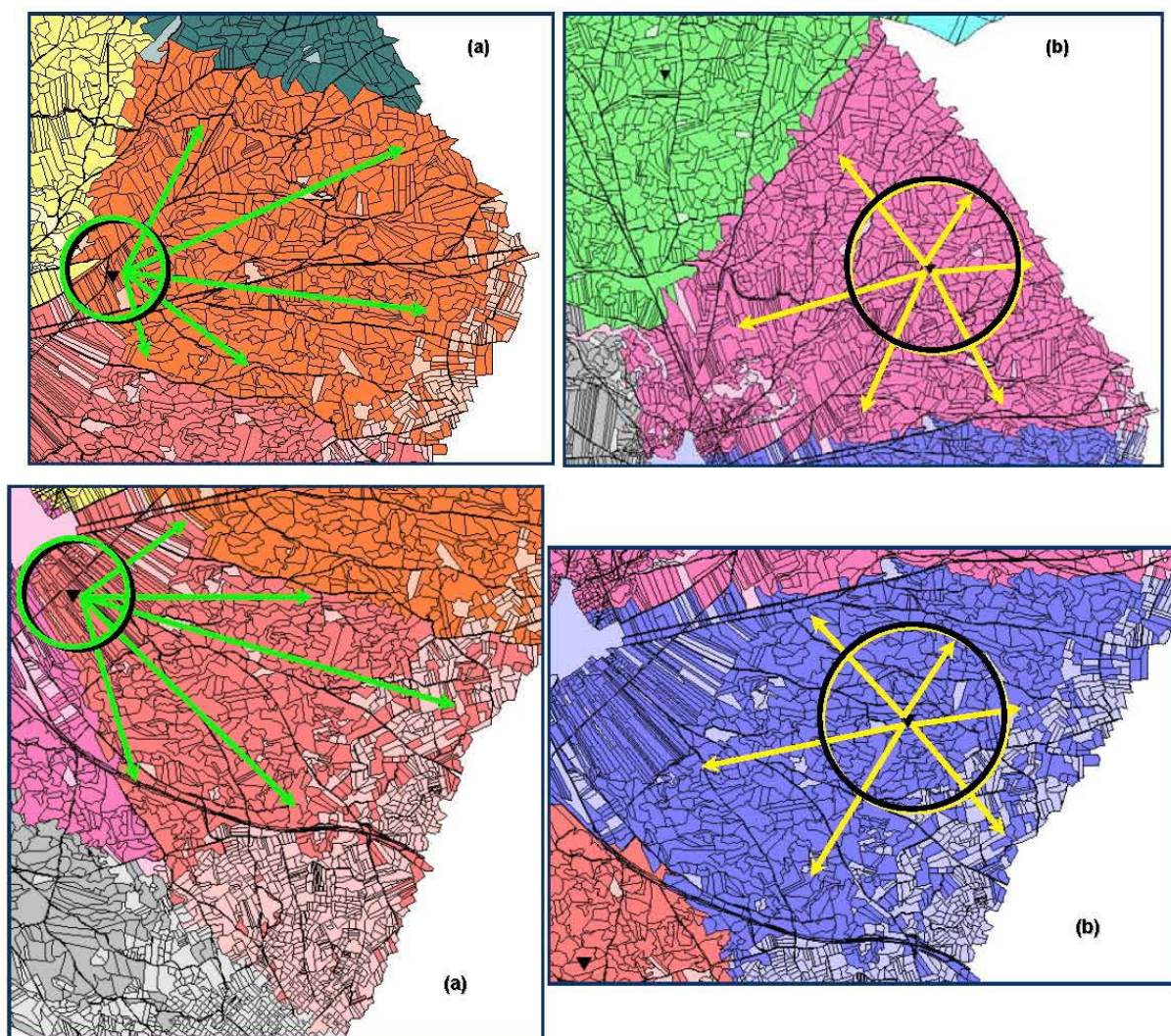


Figura 141. El cambio en la ubicación del aprisco genera un aumento de la eficiencia energética de los polígonos (b) respecto de los (a), al disminuir la longitud de los desplazamientos a las zonas de pasto.

La ubicación de los apriscos no sólo puede incidir en el grado de eficiencia del sistema agropecuario, también determina la configuración geométrica del diagrama de Voronoi que ha de resolver el modelo diseñado, existiendo configuraciones para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria. En estos casos, siempre que la aplicación genere una zonificación próxima a una correcta, se propone la intervención de un usuario que fuera modificando sucesivamente los parámetros de entrada hasta conseguir una solución válida, ajustada a los objetivos y criterios establecidos. Tras analizar los resultados, el usuario tendría que introducir cambios en los tamaños de las regiones y/o pequeños desplazamientos en las ubicaciones de los generadores. Las zonificaciones de las figuras 135 a 138 son un ejemplo de las mejoras que pueden conseguirse en los resultados, a partir de la ayuda externa suministrada por un usuario. Los desplazamientos a los que se hace referencia, se suponen virtuales, dados los problemas y dificultades que supondría un cambio real en la ubicación de los apriscos.

Por último, hay que destacar que la configuración espacial de las unidades básicas puede causar ciertas “anomalías geométricas” en los resultados de la zonificación. Las unidades del área de estudio proceden del parcelario catastral que incluye las “vías” o “caminos”. La distribución y las características espaciales de estas parcelas hicieron necesaria su división en otras unidades de menor tamaño, a fin de evitar zonificaciones con geometrías irregulares. No obstante, se han detectado regiones de formas anómalas que presentan ciertas deformaciones longitudinales en algún punto de su contorno. En el ejemplo siguiente, el polígono de color naranja de la figura izquierda tiene un par de parcelas aparentemente disjuntas del resto. Estas unidades se conectan a las otras a través de varios trozos de camino, por lo que el polígono es un recinto conexo.

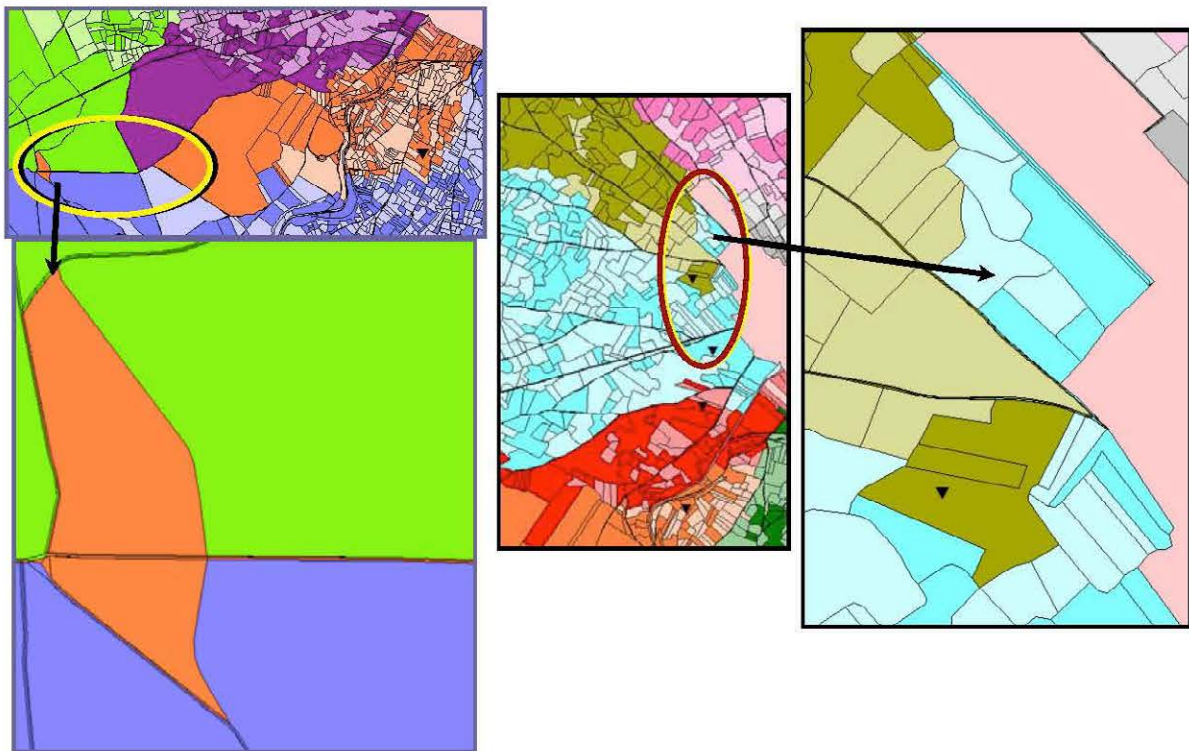


Figura 142. Ejemplos de polígonos de pasto con formas anómalas por la geometría de las parcelas de tipo camino.

Para evitar que la geometría alargada de los caminos genere polígonos de pasto de formas irregulares, sería necesario revisar y modificar, por un lado, la técnica de división usada en la fase del preproceso de datos y, por otro, el cálculo y asignación de centroides a las unidades básicas, especialmente a los elementos de la red viaria. Al simplificar las geometrías de área por puntos, se introducen ciertas deformaciones espaciales en el conjunto de datos de entrada al diagrama de Voronoi. Aunque esta sustitución facilita enormemente el modelo de solución, es obvio que puede tener efectos en los resultados, tal y como se demuestra en estos casos.



4.4 Resumen del capítulo

En este capítulo se describe el proceso de creación de un sistema de información geográfica para la gestión de los recursos agrícolas y ganaderos de la zona de estudio y se presentan los resultados de las pruebas realizadas con estos datos. Los experimentos muestran, por un lado, la viabilidad de la aplicación desarrollada para el trazado automático de zonas y, por otro, la validez del modelo para resolver problemas de zonificación en sistemas extensivos de tipo cereal-ovino.

La primera sección describe la zona de estudio que comprende tres municipios de la provincia de Toledo: Lillo, Corral de Almaguer y El Romeral. Las características de la estructura socioeconómica de esta zona justifican que sea clasificada como un sistema extensivo del tipo cereal-ovino.

La segunda sección describe los procesos correspondientes a las fases de elaboración de un proyecto de SIG. Primero se presenta el diagrama E/R correspondiente al modelo de datos diseñado, así como la relación de los atributos definidos para las clases de entidades y los parámetros espaciales para la información geográfica. A continuación se detallan las fuentes de datos utilizadas y su proceso de carga en el programa GeoMedia Professional (v.6.1.).

Posteriormente se realiza el proceso de integración, es decir, la fusión y homogenización de los diferentes conjuntos de datos del proyecto, y se describen las fases de armonización espacial horizontal, edición geométrica y armonización semántica. El objetivo de esta última es comparar los modelos y/o las clasificaciones temáticas utilizadas en las fuentes de datos a integrar (los parcelarios del catastro de rústica de los tres municipios), a fin de homogeneizar las estructuras de estos modelos y sus respectivos dominios de valores.

A continuación se lleva a cabo una edición temática para localizar y corregir los errores en la identificación y caracterización de las entidades del proyecto. En esta fase se detectan unidades con una caracterización que puede calificarse de incompleta, por carecer de algún dato significativo, o bien de singular, por tener asociados valores anómalos. También se procede a la revisión del atributo correspondiente al uso del suelo del parcelario catastral, ya que este dato es imprescindible para calcular la superficie forrajera equivalente de cada unidad o parcela. Tras hacer un estudio comparativo entre los datos del catastro y los del SIGPAC, se establecen las correspondencias entre elementos homólogos de ambas fuentes de datos, y se procede a sustituir el uso catastral por su correspondiente uso agrícola (SIGPAC).

La fase de edición estructural en este proyecto se reduce a la compleción de los atributos definidos para las entidades de la clase “parcelas”. Se describe el cálculo de la superficie forrajera equivalente (FAE), cuyos valores se obtienen en función del uso agrícola y de la superficie que éste ocupa en cada unidad. Dado que no todas las parcelas tienen un uso o cultivo compatible con el aprovechamiento forrajero, el valor asignado a este atributo no sólo ha de diferenciar las parcelas aptas para el pastoreo de las que no son, sino también de las que no



tienen aprovechamiento, distinguiendo las que admiten el tránsito de ganado (vías de comunicación, terrenos improductivos) de las parcelas que representan los núcleos de población. Finalmente, en esta sección se describe el proceso de segmentación de las parcelas catastrales pertenecientes a la red viaria. La geometría de estas unidades se caracteriza por tener un gran perímetro y una superficie mínima. La creación de un nuevo sistema zonal implica la agregación de las parcelas en polígonos de pasto, cuya forma y dimensiones estarán condicionadas por la geometría de las unidades originales. Para evitar la formación de polígonos con formas anómalas se realizó un proceso de fragmentación del viario, dividiendo los caminos en varios recintos según los puntos de intersección con las parcelas adyacentes.

En la tercera sección se presentan los resultados de las pruebas que se hicieron con la aplicación prototipo, utilizando como datos de entrada la información almacenada en el proyecto de SIG. Las pruebas realizadas ponen de manifiesto que:

- Una heurística, basada en el diagrama de Voronoi de peso aditivo adaptativo, es una técnica válida para resolver problemas de zonificación en sistemas extensivos de tipo cereal-ovino. No obstante, la aplicación de este método a un conjunto de datos representativo de estos sistemas tiene las siguientes características:
 - Necesidad de identificar las unidades básicas (parcelas) que, siendo un recurso pastoral, tienen una ubicación espacial que las hace inaccesibles al ganado e impide su aprovechamiento. *Al calcular el tamaño (superficie forrajera equivalente) de cada región (polígono de pasto), hay que descontar la superficie pastoral inaccesible.* Si el tamaño especificado para las regiones ha de corresponder al aprovechamiento efectivo de los recursos existentes, es necesario introducir algunos cambios en el algoritmo básico, de forma que la solución final se ajuste al criterio especificado en la función de parada o interrupción del proceso: el tamaño calculado de todas las regiones ha de ser, como mínimo, el 90% de su tamaño objetivo sin sobrepasar el 110% de este valor.
 - Necesidad de *cuantificar la proporción de superficie que, en cada polígono, ocupan las unidades que han de ser “excluidas” del mismo*, bien por no ser transitables por el ganado, bien porque no se pueden utilizar como recurso pastoral. El algoritmo incluye el **cálculo de un “índice de porosidad”** que puede variar entre 0 y el valor ∞ , es decir, cuando el polígono es accesible o bien totalmente inaccesible al ganado. Si el valor del índice es inferior a la unidad, la proporción de terreno transitable en el polígono es superior al resto, con independencia de la forma y distribución espacial de las parcelas inaccesibles. Los polígonos serán más idóneos, desde el punto de vista del aprovechamiento como recurso pastoral, cuanto más se aproxime a cero su índice de porosidad.



- El uso de la versión discreta de los diagramas de Voronoi conlleva la simplificación de las áreas por puntos representativos (centroides). La geometría de las unidades básicas y el método usado para calcular sus centroides determinan la distribución espacial de los puntos de entrada al diagrama de Voronoi. Ciertas configuraciones pueden generar *resultados aparentemente anómalos*. Estas zonificaciones se caracterizan porque *algunas de las regiones tienen formas irregulares y presentan ciertas deformaciones longitudinales* en algún punto de su contorno. La mayoría de las anomalías detectadas *se deben a la geometría alargada de las unidades básicas que pertenecen a la red viaria*, bien porque dicha geometría no haya sido adecuadamente dividida en el proceso de segmentación, bien porque el punto calculado como su centroide tenga una ubicación singular.
- Los parámetros de entrada, es decir, la ubicación de los generadores (apriscos) y el tamaño de las regiones, pueden configurar *problemas para los que la aplicación no puede generar una solución satisfactoria*. En estos casos, se demuestra que es posible *reconducir al algoritmo mediante ayuda externa*. Un *usuario* de la aplicación podría ajustar la zonificación obtenida, introduciendo *cambios en los tamaños de las regiones y/o pequeños desplazamientos –virtuales– en la localización de los generadores*, de forma que las zonificaciones posteriores fueran cumpliendo los criterios de entrada.
- *La aplicación desarrollada puede integrarse en un entorno SIG*, como una herramienta de partición espacial para el tratamiento de datos vectoriales. Su funcionalidad básica consistiría en el trazado automático de zonas cuyo tamaño ha de ajustarse a un valor predeterminado.
- Una vez comprobada la validez del modelo y, tras analizar las peculiaridades de las regiones que se generan en el contexto de los sistemas agropecuarios extensivos, parece viable complementar el algoritmo diseñado y/o explorar otras alternativas para conseguir soluciones que se adapten mejor a los problemas reales. El algoritmo considera básicamente la variable tamaño en el proceso iterativo adaptativo, sin tener en cuenta otras variables como la distancia que existe entre cada generador y los límites de la región que se está formando. Si la investigación estudiara la inclusión de otras variables o una combinación de ellas, de forma que en la construcción de regiones se tuvieran en cuenta otros factores, tales como el análisis de su eficiencia energética, se podrían obtener mejoras considerables en el modelo de solución.



5. CONCLUSIONES



“No viajo para llegar a ningún sitio. Lo hago tan sólo por el placer de ir”
(R. L. Stevenson)



5 CONCLUSIONES

En esta tesis se propone un *modelo para el diseño de zonas cuyo tamaño ha de ajustarse a un valor predeterminado* y que tienen que formarse alrededor de un conjunto específico de centros o semillas. El modelo, cumpliendo con el objetivo principal de este trabajo, se ha *adaptado a las características y restricciones específicas* del problema de partición espacial que se plantea en el *contexto de los sistemas extensivos agropecuarios*. La elección y diseño de este método de solución se ajusta a los objetivos específicos planteados en el apartado 1.3 de la tesis.

Tras un estudio de los modelos de solución y algoritmos utilizados en diferentes campos de aplicación del diseño de zonas, se ha confirmado que la alternativa presentada es un *método* de trabajo rápido y eficiente, al integrar técnicas de Sistemas de Información Geográfica con una *heurística basada en una versión discreta de los Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo*. En dicha versión se usa como función de distancia la métrica del camino más corto, ya que garantiza la formación de zonas conexas. En el algoritmo propuesto se usa un *parámetro L* para controlar la velocidad de convergencia del proceso de cálculo. Se ha demostrado que L no puede sustituirse por una constante numérica “universal”, válida en cualquier problema de este tipo, por lo que se ha sustituido por una expresión adaptativa cuyo valor se calcula en cada iteración del proceso de cálculo. Este valor depende de la configuración especial de los centroides que representan a las unidades básicas de área, de la localización de los generadores y de los errores relativos de cada zona en cada iteración. Además, este parámetro evita la inestabilidad del proceso de cálculo cuando existe una solución que verifica las condiciones de partida.

La heurística basada en los Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo, hasta donde llegan nuestros conocimientos, es *la primera vez que se aplica en un problema de zonificación geográfica*.

El método propuesto también se caracteriza por su *eficacia en el tratamiento de un gran número de unidades superficiales en formato vectorial*, presentado, con relativa rapidez, las correspondientes soluciones de partición espacial.

Las principales *características* de la investigación realizada pueden resumirse en:

- 1) El uso de un conjunto empírico de datos, relativos a tres municipios cuya economía se basa en un sistema extensivo de tipo cereal-ovino, ha permitido demostrar que el modelo de solución diseñado es una aproximación válida para realizar particiones espaciales en este campo de aplicación.



- 2) El tamaño de las regiones está determinado por un único atributo de medida, característico de este tipo de aplicaciones (la superficie forrajera equivalente), pero sería factible considerar otros atributos para configurar dicho parámetro.
- 3) La posición prefijada de los centros o generadores condiciona la configuración espacial que ha de resolver el diagrama de Voronoi incluido en el modelo diseñado. Esta restricción es la que permite usar uno de los métodos más sencillos para la asignación de unidades básicas a las regiones: el criterio de mínima distancia, en este caso ponderada, a sus respectivas semillas. Sin embargo, esta misma restricción puede tener un considerable impacto en la zonificación resultante, de forma que, y de acuerdo con Kalesics et al. (2005), una posición “inadecuada” difícilmente puede generar regiones válidas que verifiquen los criterios establecidos. Tal y como se ha podido comprobar, existen configuraciones de generadores para las que el algoritmo no encuentra una solución satisfactoria.

Las principales *aportaciones* de la investigación realizada pueden resumirse en:

- 1) El trabajo realizado contribuirá a potenciar la sostenibilidad del sistema extensivo cereal-ovino de Castilla-La Mancha. Este sistema comparte con el resto de sistemas ganaderos extensivos la tendencia general al abandono y una fragilidad social que se refleja, sobre todo, en la falta de cohesión entre los actores sociales implicados y las instituciones regulatorias del manejo del pastoreo, escasamente desarrolladas y poco eficientes. Dado que el sistema mixto cereal-ovino afecta a la mayor parte de los municipios de esta comunidad autónoma, se extiende por un área de gran diversidad de usos del suelo y es entre el 15 y el 30% más rentable que la suma de los sistemas cereal y ovino por separado (Fernández-Santos 2009), para contribuir al mantenimiento del sistema a nivel municipal es necesario apoyar, técnica y administrativamente, a las Comisiones Locales de Pastos.

La aplicación prototipo desarrollada para el diseño automático de zonas ayudará y facilitará la labor de estas Comisiones. Esta herramienta permite la rápida generación de polígonos de pasto según condiciones y criterios diversos, por lo que optimizará la gestión de los recursos ganaderos, no sólo a nivel local, sino en otros ámbitos administrativos.

La aplicación puede funcionar como un programa independiente o bien ser integrada en un entorno SIG, por ejemplo GeoMedia Professional.

- 2) El modelo de solución diseñado puede usarse en otros campos de aplicación, donde sea necesario definir zonas alrededor de un conjunto específico de semillas y con un tamaño que se ajuste a un valor predeterminado. En estos casos se eliminarían del programa los elementos específicos del problema tratado, tales como:



- El cálculo del tamaño ajustado de cada zona. En los sistemas extensivos, el tamaño obtenido (FAE) en el proceso iterativo del diagrama de Voronoi tiene que ser modificado para eliminar los tamaños (FAEs) de las parcelas de pasto aisladas que no pueden ser utilizadas como forraje por el ganado. En este caso, el programa ofrece el tamaño potencial frente al tamaño real del polígono de pasto, es decir, la FAE que realmente puede ser aprovechada por los rebaños.

- El cálculo de un índice de porosidad global. En los sistemas extensivos de tipo cereal-ovino las parcelas con recursos pastorales se intercalan con otras vedadas al ganado. Este hecho dificulta los desplazamientos del ganado por el polígono, condiciona el aprovechamiento efectivo de los recursos y disminuye la eficiencia energética del sistema agropecuario. Para valorar la incidencia de estos factores se calcula un índice de porosidad que representa, en cada polígono, la proporción de superficie que ocupa este tipo de parcelas respecto a las demás. El índice puede variar entre 0 -si todas las parcelas de un polígono son transitables- y el valor ∞ - el polígono es totalmente inaccesible al ganado-. Los polígonos serán más adecuados, desde el punto de vista del aprovechamiento como recurso pastoral, cuanto más se aproxime a cero su índice de porosidad.

Por último, una vez comprobada la validez del modelo y, tras analizar las peculiaridades de las regiones que se generan en el contexto de los sistemas agropecuarios extensivos, parece viable introducir mejoras en el algoritmo diseñado y/o explorar otras alternativas para conseguir soluciones que se adapten mejor a los problemas reales. En la sección siguiente se proponen las nuevas líneas de investigación que se consideran más adecuadas.

5.1 Futuras líneas de investigación

Una vez demostrado que los Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo son una herramienta de diseño de zonas apta en el ámbito de los sistemas agropecuarios, sería necesario analizar la calidad de las regiones o polígonos de pasto desde el punto de vista de la explotación ganadera.

La estructura de los sistemas extensivos del tipo cereal-ovino tiene algunas singularidades propias que, con el paso del tiempo, los han convertido en ineficaces. Evidentemente, la distribución de las parcelas de pasto en el interior de los polígonos condiciona el aprovechamiento efectivo de los recursos. Por un lado, dentro de los polígonos las parcelas con recursos disponibles se intercalan con otras de acceso restringido al ganado, motivo que justifica la presencia continua del pastor como guía de los rebaños en sus desplazamientos para conseguir alimento. Por otra parte, dado que los pastores no son propietarios de la tierra, suelen tener sus apriscos cerca de los núcleos de población, por lo que precisan mover frecuentemente sus rebaños desde estos lugares hacia los polígonos de pastos.

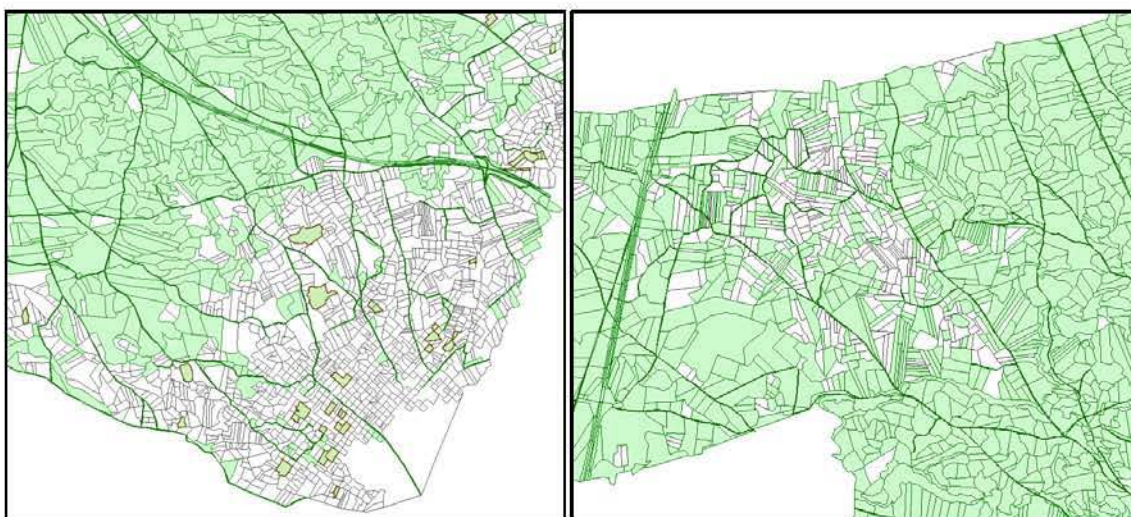


Figura 142. Detalle de la distribución de las parcelas de pasto (color verde) en el interior de dos polígonos.

Estos hechos no sólo endurecen considerablemente las condiciones de trabajo, sino que hacen ineficaz el sistema desde el punto de vista energético. Si se tiene en cuenta que una oveja pierde un 4% de su energía al recorrer 1 km, los movimientos del ganado dentro de un polígono tendrían que ser lo más eficientes posible, ya que una parte de la energía suministrada por la alimentación se consume en los desplazamientos que realiza el rebaño (Caballero et al. 2004).

Para establecer la eficiencia energética de un polígono de pasto sería necesario considerar las siguientes variables:

- (a) su forma y dimensiones,
- (b) la distribución o intercalación de las parcelas de pasto en su superficie y
- (c) las distancias a recorrer desde el aprisco a las parcelas de pasto.

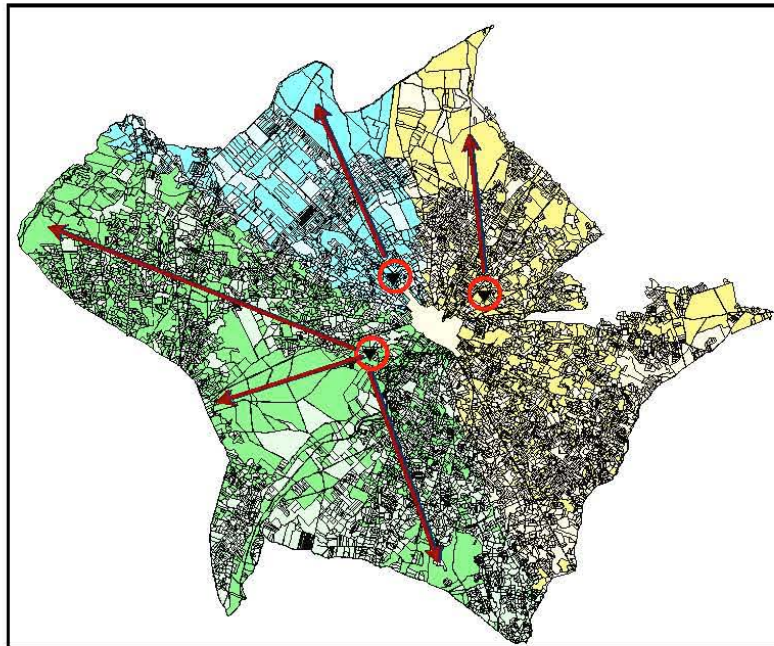


Figura 143. Ejemplo de polígonos de pasto.

Como futuro trabajo de investigación se propone el análisis de los factores indicados anteriormente, para lo cual sería necesario implementar las siguientes herramientas:

- (a) Índices de forma que aporten información sobre la geometría de los polígonos de pasto, permitiendo diferenciar regiones compactas de otras de tipo alargado, por ejemplo:

✓ Coeficiente de circularidad: $CC = \sqrt{\frac{Sup_{Poligono}}{Sup_{Circulo}}}$, donde $Sup_{poligono}$ es la superficie del

polígono y $Sup_{circulo}$ es la superficie de un círculo de su mismo perímetro (Tomlin et al. 1990). El intervalo de valores para este coeficiente es $[0...1]$, de manera que cuando se aproxima a uno, el polígono en cuestión se aproxima a la forma de un círculo, y cuando tiende a cero, el polígono se vuelve irregular y hasta puede convertirse en una línea.

✓ Índices de perímetro-área: $I_{p-a} = \frac{P^2}{Area}$, donde P es el perímetro del polígono y

Área su superficie. Si la forma del polígono es muy regular, el índice toma valores mínimos. Por el contrario, sus valores aumentan para formas muy irregulares. El sentido de crecimiento de los valores de este índice es inverso al de circularidad.



- (b) Índices de configuración y composición del paisaje, usados en estudios de ecosistemas, permitirían analizar la distribución e intercalación de las parcelas de pasto en el interior del polígono (índice de contagio, índice de fragmentación, etc.).
- (c) Medida de distancias máximas y mínimas desde el aprisco a las parcelas de pasto, para controlar los desplazamientos del ganado por el polígono.

Una vez analizados estos factores, sería conveniente integrar estos parámetros en el algoritmo del modelo para, a la vista de los resultados obtenidos, repetir o no el proceso de cálculo y generar una nueva partición donde se obtuvieran polígonos de mayor eficiencia energética.

El planteamiento de estas líneas de investigación surge a partir de un estudio previo, en el que se han realizado una serie de experimentos con los índices descritos, de donde se concluye su idoneidad para trabajos futuros. Por ejemplo, el uso de algún tipo de índice de forma permitiría obtener información sobre la geometría de los polígonos de pasto. Si fuera necesario clasificar estos polígonos según su compacidad, podría usarse el coeficiente de circularidad, de modo que las regiones de mayor valor serían las de formas más compactas. La compacidad de una geometría bidimensional implica no sólo una forma próxima a la de un círculo, sino una superficie con el menor número de agujeros posible o, en caso de existir, que tiendan a estar concentrados en un espacio reducido. Según este criterio se ha clasificado, en orden creciente, la geometría correspondiente a la zona transitable por el ganado de los polígonos del gráfico inferior, siendo el 4, 3, 35 y 33 los de formas más compactas.

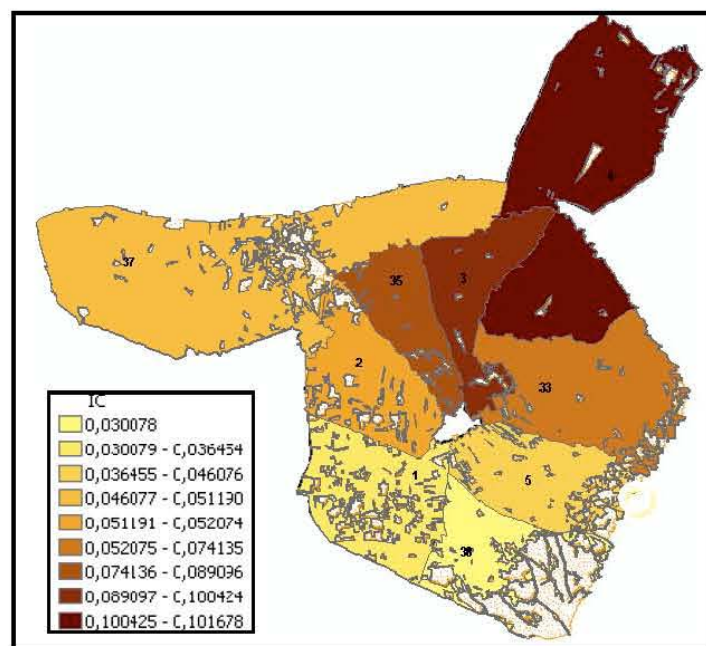


Figura 144. Ejemplos del valor del coeficiente de circularidad en varios polígonos de pasto.



Del estudio realizado hay que destacar que los índices más relevantes, por su singularidad, son los de configuración y composición del paisaje, de los que únicamente se han seleccionado los siguientes:

- Índice de Contagio
- Índice de División
- Índice de Fragmentación
- Índice de Cohesión
- Índice de Agregación

Para comprender la funcionalidad e interés de estos índices, en el apéndice 7.1 se presenta una breve síntesis de los conceptos más importantes relativos a paisaje y ecosistemas.

Para finalizar esta sección, habría que comentar la búsqueda de alternativas al modelo diseñado en aquellos casos en los que la configuración geométrica de los generadores impide obtener una solución satisfactoria. El uso de un algoritmo adaptativo en problemas de partición complejos, permite introducir mejoras y generar soluciones flexibles. Tal y como se ha descrito en la sección 3.4.4.2, cuando el modelo diseñado no encuentra una solución ajustada a las especificaciones de partida, es posible encontrar una partición espacial de menor error. La aplicación podría ofrecer una solución de compromiso, cuyo error sería superior al umbral establecido, deteniendo el proceso en el momento en que el E_{medio}^1 , error medio de los valores absolutos de los errores relativos, sea el mínimo de los calculados durante el bucle. Con este criterio, esta solución sería una de las mejores zonificaciones generadas en el proceso hasta llegar al número máximo de iteraciones.

No obstante, también sería factible introducir una serie de mejoras para forzar la existencia de soluciones válidas. En la sección 4.3.1 se muestra la posibilidad de guiar a la aplicación, generando sucesivas zonificaciones que se ajusten en mayor medida a las especificaciones dadas. En este apartado se propone la intervención de un usuario que, tras analizar los resultados, fuera introduciendo cambios en los tamaños de las regiones y/o pequeños desplazamientos en las ubicaciones de los generadores. Dado que ambos parámetros forman parte del conjunto de datos de entrada a la aplicación, se podría considerar el uso de generadores virtuales cuya posición, respecto a los originales, se fuera modificando automáticamente en la dirección adecuada, hasta que fuera posible la construcción de las regiones según los criterios establecidos.

$$^1 E_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{|a(z_i) - A(z_i)|}{A(z_i)}}{m}$$



Otra línea de investigación, complementaria a la anterior, y que permitiría conseguir soluciones que se adaptasen mejor a las características de los problemas existentes, sería la exploración de otras propiedades de los diagramas de Voronoi. Por ejemplo, estos diagramas permiten la introducción de obstáculos físicos o barreras en el modelo. Este tipo de situaciones se corresponde con la distribución de zonas inaccesibles al ganado y sin aprovechamiento forrajero. El número y distribución de estas zonas en el interior de los polígonos de pasto condiciona, junto con la posición del generador, los desplazamientos de los animales y la eficiencia energética de cada polígono. Si en el algoritmo basado en los diagramas de Voronoi se incorporaran estas zonas como obstáculos y, además, existiera la posibilidad de aplicar desplazamientos virtuales en los generadores, se podrían obtener mejoras considerables en el modelo de solución. En esta línea de investigación, el proceso de trabajo sería el siguiente:

- ✓ Generación de una partición con el algoritmo diseñado en esta tesis, complementado el resultado con un estudio de la eficiencia energética de los polígonos generados. Este estudio se basa en el cálculo de los parámetros indicados al principio de esta sección (índices de forma, índices de configuración y composición del paisaje, etc.).
- ✓ Si el 75% de los polígonos no son eficientes, se realizaría una segunda zonificación con la variante del algoritmo que incluyera la existencia de barreras. En este caso, antes del proceso iterativo, sería necesaria no sólo la detección de todas las zonas inaccesibles existentes en el territorio, sino también su evaluación, en función de su tamaño y ubicación, para clasificarlas o no como obstáculos e incluirlas en el diagrama de Voronoi. La evaluación de estas zonas podría realizarse con un estudio de porosidad a nivel local: en cada parcela inaccesible se considera una zona de influencia, definida por una distancia específica, y se calcula el índice de porosidad de dicha zona²; si el valor calculado es superior a un determinado umbral, la parcela se incluye en la lista de obstáculos.
- ✓ Generación de la nueva zonificación a partir de la variante del algoritmo basada en los diagramas de Voronoi con obstáculos.

²

$$Porosidad(z_i) = \frac{Área_No_tránsito(z_i)}{Área_Tránsito(z_i)} = \frac{\sum_{x_j \in z_i} Área_{x_j} \times (1 - acceso_j)}{\sum_{x_j \in z_i} Área_{x_j} \times (acceso_j)}$$



5.2 Resumen del capítulo

En la primera sección de este capítulo se citan las principales características del modelo de solución diseñado para el trazado automático de zonas en problemas con las siguientes características: las regiones han de construirse alrededor de un conjunto específico de semillas y su tamaño ha de ajustarse a un valor predeterminado. También se presenta un resumen de las aportaciones y limitaciones del trabajo realizado en esta tesis.

En la última sección, se describen las futuras líneas de investigación que permitirían mejorar el modelo diseñado desde dos perspectivas:

- a) Aportación de información complementaria para evaluar la geometría y eficiencia energética de los polígonos de pasto.

En la mayoría de los problemas de partición espacial se requieren, por motivos diversos, zonas lo más compactas posibles. En el caso particular de la gestión de sistemas agropecuarios extensivos, también sería deseable que los polígonos de pasto fueran lo más compactos posible. Para evaluar esta propiedad y la geometría de dichas regiones, se propone el cálculo de índices de forma, tales como: el coeficiente de circularidad, índices de perímetro-área, etc.

Una característica específica de los polígonos de pasto es la posibilidad de evaluar su idoneidad desde el punto de vista de la eficiencia energética. Esta propiedad está determinada, fundamentalmente, por el número y longitud de los desplazamientos que ha de realizar el ganado desde el aprisco a las parcelas con aprovechamiento forrajero. A su vez, estos desplazamientos están condicionados por la ubicación del aprisco y por la distribución en el interior del polígono de las parcelas inaccesibles o no aptas como recurso pastoral. Para evaluar la eficiencia energética de los polígonos de pasto se propone el cálculo de:

- Índices de configuración y composición del paisaje (contagio, división, cohesión, agregación y fragmentación).
- Medidas de distancias entre los apriscos y las parcelas del polígono con aprovechamiento forrajero.

La integración de estos parámetros en el algoritmo del modelo permitiría evaluar los resultados de la zonificación y, en función de los valores obtenidos, se podría repetir o no el proceso, para generar una nueva partición donde se obtuvieran polígonos de mayor eficiencia energética. El cálculo de una nueva solución exigiría introducir algunos cambios en el modelo diseñado.



b) Búsqueda de mejoras y/o alternativas al modelo diseñado para resolver los casos donde no se llega a una solución satisfactoria, o bien para conseguir soluciones que se adapten mejor a las características de los problemas existentes. En este sentido se proponen dos líneas de investigación complementarias:

- Intervención de un usuario para introducir cambios en los tamaños de las regiones y/o pequeños desplazamientos en las ubicaciones de los generadores.
- Estudio y aplicación de los diagramas de Voronoi con obstáculos. En este tipo de aplicaciones, todas las zonas que no son un recurso pastoral o no pueden ser transitadas por el ganado se clasificarían como barreras u obstáculos.



6. BIBLIOGRAFÍA



*“Ahora sé que mi único destino
es la certidumbre de la vejez,
la cercanía de la nada
y su belleza aterradora”
(Fayad Jamis)*



6 BIBLIOGRAFIA

- Aerts, J. C. J. H.; Heuvelink, G. B. M., 2002. Using simulated annealing for resource allocation. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 16, nº 6, pp. 571-587.
- Aerts, J. C. J. H.; Eisinger, E. et al., 2003. Using Linear Integer Programming for Multi-Site Land-Use Allocation. *Geographical Analysis*, vol. 35, nº 2, pp. 148-169.
- Ahmadi, F. A., 2006. Geographical Study of School Attendance Areas Using the Multiplicatively Weighted Voronoi Method: A Case of Rasht City. Disponible en: http://giswin.geo.tsukuba.ac.jp/sis/thesis/Fatemeh_AHAMADI_NEJAD_MASOULEH.pdf (fecha de acceso: 4/05/2010).
- Alani, H.; Jones, C. B.; Tudhope, D., 2001. Voronoi-based region approximation for geographical information retrieval with gazetteers. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 15, nº 4, pp. 287-306.
- Altman, M., 1997. Is automation the answer? The computational complexity of automated redistricting. *Rutgers Computer and Law Technology Journal*, vol. 23, nº 1, pp. 81-142.
- Alvanides, S.; Openshaw, S.; Rees, P., 2002. Designing your own geographies. En *The Census Data System*. P. Rees, D. Martin and P. Williamson (Eds.), Chichester: Wiley, pp. 47-65.
- Anselin, L., 2003. *GeoDa 0.9 User's Guide*. Urbana-Champaign, IL: Spatial Analysis Laboratory (SAL), Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois.
- Armstrong, M. P.; Lolonis, P.; Honey R., 1993. A spatial decision support system for school redistricting. *URISA Journal*, pp. 40-52.
- Assunção, R. M.; Corrêa, M.; Câmara, G.; Costa, C., 2006. Efficient regionalisation techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 20, nº 7, pp. 797-811.
- Bação, F.; Lobo, V.; Painho, M., 2005. Applying genetic algorithms to zone design. *Soft Computing- A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, vol. 2, nº 5, pp. 341-348
- Bandy, G.; Baber, C. M., 1992. Impact of land use alternatives on transportation demand. En *Microcomputers in Transportation: Proceedings of the 4th International Conference on Microcomputers in Transportation*, American Society of Civil Engineers, New York, pp 202 - 213
- Black, J., 1981. *Urban Transportation Planning: Theory and Practice*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD.
- Benabdallah, S.; Wright, J. R., 1992. Multiple subregion allocation models. *ASCE Journal of Urban Planning and Development*, vol. 118, pp. 24-40.
- Bergey, P. K.; Ragsdale, C. T.; Hoskote, M., 2003. A simulated annealing genetic algorithm for the electrical power districting problem. *Annals of Operations Research*, vol. 121, pp. 33-55.



- Bodin, L. C., 1973. A districting experiment with a clustering algorithm. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 19, pp. 209–214.
- Bong, C. W.; Chai, W. Y; Wong, C., 2004. W. State of the Art Multiobjective Metaheuristic for Redistricting. *OCEAN'04 MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, vol. 2, pp. 763-769.
- Boots, B., 1973. Some models of the random subdivision of space. *Geografiska Annaler*, vol. 55, pp. 34-48.
- Boots, B., 1975. Patterns of urban settlements revisited. *The Professional Geographer*, vol. 27, pp. 426-431.
- Boots, B., 1980. Weighting Thiessen polygons. *Economic Geography*, vol. 56, pp. 248-259.
- Boots, B., 1986. Voronoi (Thiessen) Polygons. Norwich: Geo Books.
- Boots, B.; Getis, A., 1988. Point pattern analysis. *Scientific Geography Series*, vol. 8, Sage Publications Inc. London.
- Boots, B.; South, R., 1997. Modeling retail trade areas using higher-order, multiplicatively weighted Voronoi diagrams. *Journal of Retailing*, vol. 73, nº 4, pp. 519-536.
- Boots, B.; Okabe, A.; Thomas, R., Editors, 2003. *Modelling Geographical Systems: Statistical and Computational Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Boyland, M.; Nelson, J; Bunnell, F. L., 2004. Creating land allocation zones for forest management: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, nº 8, pp. 1669-1682.
- Boyle, P. J.; Dunn, C. E., 1991. Redefinition of enumeration district centroids: A test of their accuracy using Thiessen polygons. *Environmental Planning A*, vol. 23, pp. 1111–9.
- Bozkaya, B.; Erkut, E.; Laporte, G., 2003. A tabu search heuristic and adaptive memory procedure for political districting. *European Journal of Operational Research*, vol. 144, nº 1, pp. 12–26.
- Brookes, C. J., 1997. A parameterized region-growing programme for region allocation on raster suitability maps. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 11, pp. 375-396.
- Browdy, M. H., 1990. Simulated annealing: An improved computer model for political redistricting. *Yale Law and Policy Review*, vol. 8, pp. 163–179.
- Caro, F.; Shirabe, T. et al., 2004. School Redistricting: Embedding GIS Tools with Integer Programming. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55, nº 8, pp. 836-849.
- Caballero, R.; Rioperez, J.; Fernández, E.; Arauzo, M.; Hernaiz, P. J., 1992. Performance of Manchaga ewes grazing cereal stubbles and cultivated pastures. *Small Ruminant Research*, vol. 7, pp. 315-329.
- Caballero, R., 2001. Typology of cereal-sheep farming systems in Castile-La Mancha (south-central Spain). *Agricultural Systems*, vol. 68, pp. 215-232.
- Caballero, R., 2003. A set of guidance for the management of grazing units in the cereal-sheep system of Castile-La Mancha (south-central Spain). *J. Sust. Agric.*, vol. 21, nº 3, pp. 11-28.
- Chakroun, H.; Benie, G.; O'Neill, N. T.; Desilets, J., 2000. Spatial analysis weighting algorithm using Voronoi diagrams. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 14, pp. 319–336.
- Chen, P.-S. P., 1976. The Entity-Relationship model. Toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*, vol. 1, nº. 1. March, pp. 9-36.



- Chen, W.; Jin, R.; Simpson, T. W., 2001. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Paper nº AIAA-2000-4801.
- Corrêa, M; Câmara, G.; Assunção, R.; Costa, C., 2002. Procedimentos Automáticos e Semi-automáticos de Regionalização por Árvore Geradora Mínima. Simpósio Brasileiro. Disponible en: <http://www.dpi.inpe.br/geoinfo/geoinfo2002/papers/Neves.pdf> (fecha de acceso: 22/02/2010).
- Cova, T. J., 1999. GIS in emergency management. En *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications, and Management*, P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, D.W. Rhind (eds.), John Wiley & Sons, New York, pp. 845-858.
- Cova, T. J.; Church, R. L., 2000. Contiguity constraints for single-region site search problems. *Geographical Analysis*, vol. 32, nº 4, pp. 306-329.
- Crema, S. C., 1996. A comparison between linear programming and a choice heuristic approach to multi-objective decision making using GIS. *Proc. of GIS/LIS '96*, pp. 954-963.
- Cromley, R. G.; Hanink, D. M., 1999. Coupling land use allocation models with raster GIS. *Journal of Geographical Systems*, vol. 1, pp. 137-153.
- D'Amico, S. J.; Wang, S. J.; Batta, R.; Rump, C. M., 2002. A simulated annealing approach to police district design. *Computers and Operations Research*, vol. 29, nº 6, pp.667-684.
- Daras, K., 2006. An information statistics approach to zone design in the geography of health outcomes and provision. En PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
- Densham, P. J., 1994. Integrating GIS and spatial modeling: visual interactive modeling and location selection. *Geographical Systems*, vol. 1, nº 3, pp. 203-219.
- Diamond, J. T.; Wright J. R., 1991. Implicit enumeration technique for the land acquisition problem. *Civil engineering and environmental systems*, vol. 8, nº 2, pp. 101-114.
- Ding, C.; Hanley, P.; Kim, T. J., 1994. ARCTAN:ARC/INFO interface for transportation planning. Paper presented at ESRI Users Conference, Palm Springs, CA.
- Dong, P., 2008. Generating and updating multiplicatively weighted Voronoi diagrams for point, line and polygon features in GIS. *Computers & Geosciences*, vol. 34, pp. 411-421
- Duque, J. C.; Ramos, R.; Surifiach, J., 2006. Supervised regionalization methods: a survey. *Research Institute of Applied Economics, Working Papers 2006/81*
- Eagleson, S.; Escobar, F.; Williamson, I. P., 2001. Developing a theoretical framework for the delineation of administrative boundaries within a rural context. En *Proceedings of AURISA*. The Grand Hyatt, Melbourne, VIC, 19-23 November (CD-ROM).
- Eagleson, S.; Escobar, F.; Williamson, I. P., 2002. Hierarchical spatial reasoning theory and GIS technology applied to the automated delineation of administrative boundaries. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 26, pp. 185-200.
- Eagleson, S., 2003. GIS applied to administrative boundary design. PhD Thesis, Department of Geomatics, University of Melbourne. Disponible en: http://www.csdila.unimelb.edu.au/publication/thesis/Serryn-Phd_Thesis.pdf (fecha de acceso: 27/09/2011).
- Eastman, J. R.; Kyem, P. A. K.; Toledano, J., 1993. A procedure for multi-objective decision making in GIS under conditions of conflicting objectives. *Proceedings of EGIS F93*, pp. 438-447.



- Eastman, J. R.; Jiang, H.; Toledano, J., 1998. Multi-Criteria and Multi-Objective Decision Making for Land Allocation using GIS. En Euro Beinat and Peter Nijkamp, eds., *Multi-Criteria Analysis for Land-use Management, Environment and Management*, vol. 9, pp. 227-251.
- El-Farzi, E; Mitra, G., 1992. Solution of Set-Covering and Set-Partitioning Problems Using Assignment Relaxations. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 43, nº 5, pp. 483-93.
- Fernández-Santos, F. J., 2009. Sustainability in extensive european systems of grassland management: A case study of the cereal-sheep system in Castilla-La Mancha. Tesis de la U.P.M., Departamento de Producción Vegetal (Fitotecnia), Madrid, España.
- Ferrer, L. V.; Mangado, J. M., 2001. Evaluación de la oferta pastable de los residuos de la cosecha de cereal de invierno en la ribera del Ebro de Navarra. *Actas de la XLI R.C. de la SEEP*, Alicante, España, pp. 555-561.
- Fleischmann, B.; Paraschis, J. N., 1988. Solving a large scale districting problem: a case report. *Computers & Operations Research*, vol. 15, nº 6, pp. 521-533.
- Forman, S. L.; Yue, Y., 2003. Congressional districting using a TSP-based genetic algorithm. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, vol. 2724, pp. 2072-2083.
- Gahegan, M.; Lee I., 2000. Data structures and algorithms to support interactive spatial analysis using dynamic Voronoi diagrams. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 24, nº 6, pp. 509-537.
- Galvão, L. C.; Novaes, A. G. N; de Cursi, J. E. S.; Souza, J. C., 2006. A multiplicatively-weighted Voronoi diagram approach to logistics district. *Computers & Operations Research*, vol. 33, pp. 93-114.
- Garfinkel, R. S.; Nemhauser, G. L., 1970. Optimal political districting by implicit enumeration techniques. *Management Science*, vol. 16, pp. 495-508.
- Guessous, F.; Kabbali, A.; Narjisse, H., 1992. Livestock in the Mediterranean cereal production systems. European Association for Animal Production, *EAAP Publication*, nº 49. Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, The Netherland.
- Gilbert, K. C.; Holmes, D. D.; Rosenthal, R. E., 1985. A Multiobjective Discrete Optimization Model for Land Allocation. *Management Science*, vol. 31, nº 12, pp. 1509 - 1522.
- Glover, F., 1977. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, vol. 8, nº 1, pp. 156-166.
- Glover, F., 1986. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers and Operations Research*, vol. 13, nº 5, pp. 533-549.
- Glover, F., 1989. Tabu search – Part I. *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, pp. 190-206.
- Glover, F.; Laguna, M., 1989. Target Analysis to Improve a Tabu Search Method for Machine Scheduling. *Technical Report, Advanced Knowledge Research Group*, US West Advanced Technologies, Boulder, CO.
- Gold, C. M., 1991. Problems with handling spatial data, the Voronoi approach. *CISM (Canadian Institute of Surveying and Mapping) Journal*, vol. 45, pp. 65-80.
- Gold, C. M., 1994. A review of potential applications of Voronoi methods in geomatics. En *Proceedings of the Canadian Conference on GIS*. Ottawa, Canada, pp. 1647-1656.
- Gold, C. M., 1994. Advantages of the Voronoi spatial model. En *Proceedings, Eurocarto Xli*. Copenhagen Eurocarto, pp. 1-10.



- Gold, C. M.; Condal, A. R., 1995. A spatial data structure integrating GIS and simulation in a marine environment. *Marine Geodesy*, vol. 18, pp. 213–228.
- Gold, C. M.; Angel, P., 2006. Voronoi hierarchies. In: *Proceedings of GIScience*, Munster, Germany, pp. 99–111.
- Guo, J.; Trinidad, G.; Smith, N., 2000. MOZART: A Multi-Objective Zoning and Aggregation Tool. En *Proceedings of Philippine Computing School Congress (PCSC)*, pp. 197–201.
- Haining, R.; Wise, S.; Ma, J., 1996. The design of a software system for the interactive spatial statistical analysis linked to a GIS. *Computational Statistics*, vol. 11, pp. 449–466.
- Haining, R. P.; Wise, S.; Ma, J., 2000. Designing and implementing software for spatial statistical analysis in a GIS environment. *Journal of Geographical Systems*, vol. 2, pp. 257–286.
- Hess, S. W.; Weaver, J. B.; Siegfeldt, H. J.; Whelan, J. N.; Zitlau, P. A., 1965. Nonpartisan political redistricting by computer. *Operations Research*, vol. 13, n° 6, pp. 998–1006.
- Hess, S. W.; Samuels, S. A., 1971. Experiences with a sales districting model: Criteria and implementation. *Management Science*, vol. 18, n° 4, part II, pp. 41–54.
- Hojati, M., 1996. Optimal political districting. *Computers & Operations Research*, vol. 23, n° 12, pp. 1147–1161.
- Horn, M. E. T., 1995. Solution techniques for large regional partitioning problems. *Geographical Analysis*, vol. 27, n° 3, pp. 230–248.
- Huff, D. L.; Lutz, J. M., 1979. Ireland’s urban system. *Economic Geography*, vol. 55, pp. 196–212.
- Kalcsics, J.; Nickel, S.; Schröder, M., 2005. Towards a unified territory design approach: applications, algorithms, and GIS integration. Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern, Germany, n° 71.
- Kalcsics, J.; Nickel, S.; Schröder, M., 2005. Towards a unified territory design approach: applications, algorithms, and GIS integration. *Sociedad de Estadística e Investigación Operativa TOP*, vol. 13, n° 1, pp. 1–56, DOI: 10.1007/BF02578982.
- Kalcsics, J.; Nickel, S.; Schröder, M., 2009. A generic geometric approach to territory design and districting. Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern, Germany, n° 153.
- Ledoux, H.; Gold, C. M., 2006. A Voronoi-based map algebra. En *Progress in Spatial Data Handling—12th International Symposium on Spatial Data Handling*. A. Reidl, W. Kainz and G. Elmes (Eds.), Springer, New York, pp. 117–131.
- Li, C.; Chen, J.; Li, Z., 1999. A raster-based method for computing Voronoi diagrams of spatial objects using dynamic distance transformation. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 13, pp. 209–225.
- Liittschwager, J., 1973. The Iowa redistricting system. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 219, pp. 221–235.
- López-Blanco, J., 1994. The Role of GIS-User interactive process in the delineating boundaries or environmental units for land management: An application in Baja California, Mexico. *Proceedings of GIS/LIS 94, ACSM-ASPRS-AAB-URISA-AM/RM*, Bethesda, pp. 545–554.
- Macmillan, W., 2001. Redistricting in a GIS environment: An optimization algorithm using switching-points. *Journal of Geographical Systems*, vol. 3, n° 2, pp. 167–180.



- Macmillan, W.; Pierce, T., 1992. Optimization modelling in a GIS framework: the problem of political districting. *Specialist meeting, April 16-18*. National Center for Geographic Information and Analysis.
- Macmillan, W.; Pierce, T., 1994. Optimization modeling in a GIS framework: the problem of political redistricting. En *Spatial Analysis and GIS*, eds. Fotheringham, S. y Rogerson, P., Taylor & Francis, London, pp. 221-246.
- Martin, D., 1998. Optimizing census geography: the separation of collection and output geographies. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12, pp. 673-685.
- Martin, D., 2000. Census 2001: Making the best of zonal geographies. *Proceedings of The Census Population: 2000 and Beyond*, 22-23 June 2000, University of Manchester.
- Martin, D., 2003. Extending the automated zoning procedure to reconcile incompatible zoning systems. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 17, pp. 181-196.
- Mehrotra, A.; Johnson, E. L.; Nemhauser, G. L., 1998. An optimization based heuristic for political districting. *Management Science*, vol. 44, pp. 1100-1114.
- Mu, L., 2004. Polygon Characterization with the Multiplicatively Weighted Voronoi Diagram. *The Professional Geographer*, vol. 56, nº 2, pp. 223-239.
- Mu, L.; Wang, X., 2006. Population landscape: a geometric approach to studying spatial patterns of the US urban hierarchy. *International Journal of Geographical Information Science*, Taylor and Francis Ltd, vol. 20, pp. 649-667.
- Mu, L.; Radke, J., 2009. A weighted difference barrier method in landscape genetics. *Journal of Geographical Systems*, vol. 11, pp. 141-154.
- Muyldermans, L.; Cattrysse, D.; Van Oudheusden, D.; Lotan, T., 2002. Districting for salt spreading operations. *European Journal of Operational Research*, vol. 139, nº 3, pp. 521-532.
- Novaes, A. G. N.; Souza de Cursi, J. E.; da Silva, A. C. L.; Souza, J. C., 2009. Solving continuous location-districting problems with Voronoi diagrams. *Computers and Operations Research*, vol. 36, nº 1, pp. 40-59.
- Nygreen, B., 1988. European assembly constituencies for Wales: comparing of methods for solving a political districting problem. *Math. Program*, vol. 42, pp. 159-169.
- Ochoa, A.; Bernabé, B.; Ochoa, O., 2009. Towards a parallel system for demographic zonification based on complex networks. *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 7, nº 2, pp. 218-232.
- Okabe, A.; Boots, B.; Sugihara, K., 1992. Spatial tessellations, concepts and applications of Voronoi diagrams. New York: John Wiley and Sons.
- Okabe, A.; Boots, B.; Sugihara, K., 1994. Nearest neighborhood operations with generalized Voronoi diagrams: a review. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 8, nº 1, pp. 43-71.
- Okabe, A.; Suzuki, A., 1997. Locational optimization problems solved through Voronoi diagrams. *European Journal of Operational Research*, vol. 98, pp. 445-456.
- Okabe, A.; Boots, B.; Sugihara, K.; Chiu, S. N., 2000. *Spatial Tessellations. Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. Wiley: Chichester, UK.
- O'Neil, W. A., 1991. Developing optimal traffic analysis zones using GIS. *ITE Journal*, vol. 61, pp. 33-36.



- Openshaw, S. A., 1977. Geographical solution to scale and aggregation problems in region-building, partitioning and spatial modelling. *Transactions of the Institute of British Geographers, New Series*, vol. 2, nº 4, pp. 459-472.
- Openshaw, S. A., 1978. An empirical study of some zone design criteria. *Environment and Planning A*, vol. 10, pp. 781-794.
- Openshaw, S. A., 1984. *The modifiable areal unit problem*. Norwich, UK, Geo Books.
- Openshaw, S.; Rao, L., 1995. Algorithms for reengineering 1991 census geography. *Environment and Planning A*, vol. 27, pp. 425-446.
- Openshaw, S.; Wymer, C., 1995. *Census Users Handbook*, capítulo Classifying and regionalizing census data, pp. 239-270. Cambridge, UK, GeoInformation International.
- Openshaw, S.; Albanides, S.; Whalley, S., 1998. Some further experiments with designing output areas for the 2001 UK census. Paper presented at the 4th of the ESRC/ JISC supported workshops. Disponible en: www.geog.leeds.ac.uk/papers/98-9 (fecha de acceso: 27/05/2011).
- Openshaw, S.; Albanides, S., 1999. Zone design for planning and policy analysis. En *Geographical Information and Planning*. J. Stillwell, S. Geertman and S. Openshaw (Ed.), Berlin: Springer, pp. 299-315.
- Openshaw, S.; Albanides, S., 2001. Designing zoning systems for representation of socio-economic data. En *Time and Motion of Socio-Economic Units*, A. Frank, J. Raper and J. Cheylan (Ed.) London: Taylor and Francis.
- Rajabifard, A.; Williamson, I. P., 2001. Regional administrative boundaries pilot project report. En *7th Meeting of the Permanent Committee on GIS Infrastructure for Asia and the Pacific (PCGIAP)*, 23-27 April 2001, Tsukuba, Japan. Disponible en: http://www.gsi.go.jp/PCGIAP/tsukuba/Draft_User.pdf (fecha de acceso: 27/09/2008).
- Reitsma R.; Trubin S.; Sethia S., 2004. Information space regionalization using adaptive multiplicatively weighted Voronoi diagrams. *Proceedings of the Eight International Conference on Information Visualization IV 2004*. IEEE Computer Society: Los Alamitos, CA, pp. 290-293.
- Reitsma, R.; Thabane, L.; Macleod, M., 2004. Adaptive Multiplicatively Weighted Voronoi Diagrams for Information Space Regionalization. *Journal of the American Society for Information Systems and Technology*, vol. 55, pp. 13-22.
- Reitsma R.; Trubin S., 2007. Information space partitioning using adaptive Voronoi diagrams. *Information Visualization*, vol. 6, pp.123-138.
- Ricca, F.; Simeone, B., 1997. Political districting: Traps, criteria, algorithms and tradeoffs. *Ricerca Operativa AIRO*, vol. 27, pp. 81-119.
- Ricca, F.; Scozzari, A.; Simeone, B., 2008. Drawing political districts by weighted Voronoi regions and local search. *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 48, pp. 1468-1477.
- Ricca, F.; Simeone, B., 2008. Local search algorithms for political districting. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, vol. 189, nº 3, pp. 1409-1426.
- Ríos-Mercado, R. Z.; Fernández, E., 2009. A reactive GRASP for a commercial territory design problem with multiple balancing requirements. *Computers & Operations Research*, vol. 36, pp. 755-776.
- Rosing, K.; ReVelle, C., 1986. Optimal clustering. *Environment and Planning A*, vol. 18, pp. 1463-1476.



- Segal, M.; Weinberger, D. B., 1977. Turfing. *Operations Research*, vol. 25, nº 3, pp. 367-386.
- Shanker, R. J.; Turner, R. E.; Zoltners, A. A., 1975. Sales territory design: An integrated approach. *Management Science*, vol. 22, pp. 309-320.
- Shirabe, T. A., 2005. Model of Contiguity for Spatial Unit Allocation. *Geographical Analysis*, vol. 37, nº 1, pp. 2-16.
- Shirabe, T.; Tomlin, C. D., 2002. Decomposing Integer Programming Models for Spatial Allocation. En *Proceedings of the Second International Conference on Geographic Information Science, GIScience 2002*. M. J. Egenhofer and D. M. Mark (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science* 2478, Berlin: Springer-Verlag, pp. 300-312.
- Sim, K. H., 2002. Integrating Genetic Algorithm in Simulated Annealing for Redistricting. Dissertation for Master Degree of Information Technology, University of Malaysia Sarawak, Kota Samarahan.
- Solís, N.; Ríos-Mercado, R. Z.; Álvarez, A. M., 2009. Modelando sistemas territoriales con programación entera. *Ingenierías*, vol. 12, nº 44, pp. 7-15.
- Stewart, C. W.; Van der Ree, R., 2010. A Voronoi diagram based population model for social species of wildlife. *Ecological Modelling*, vol. 221, pp. 1554-1568.
- Stillwell, J.; Langley, R., 1999. "Information and Planning in Education Sector". Geographical Information and Planning. Stillwell J., Geertman S. and Openshaw S. (Eds.). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Taylor, P., 1973. Some implication of spatial organization of elections. *Transaction of the Institute of British Geographers*, vol. 60, pp. 121-136.
- Tavares-Pereira, F.; Figueira, J.; Mousseau, V.; Roy, B., 2007. Multiple criteria districting problems. The public transportation network pricing system of the Paris region. *Annals of Operations Research*, vol. 154, pp. 69-92.
- Thoreson, J.; Littschwager, J., 1967. Legislative districting by computer simulation. *Behavioral Science*, vol. 12, pp. 237-247.
- Tiede, D.; Strobl, J., 2006. Polygon-based Regionalisation in a GIS Environment. En *Trends in Knowledge-Based Landscape Modeling*. Buhmann, E., Ervin, S., Jørgensen, I., Strobl, J. (Eds.), Heidelberg: Wichmann-Verlag, pp. 54-59. Disponible en: http://www.masterla.de/conf/pdf/conf2006/23Tiede_L.pdf. [Consulta: 22-02-2010].
- Tiefelsdorf, M.; Boots, B., 1997. GAMBINI, A GIS utility program to calculate multiplicatively weighted Voronoi diagrams, v1.01. Disponible en: <http://www.wlu.ca/~wwwgeog/special/download/gambini.htm> (fecha de acceso: 22/02/2006).
- Tomlin, C. D.; Johnston, K. M., 1990. An experiment in land-use allocation with a geographic information system. *Introductory Readings in Geographic Information Systems*. Taylor & Francis, London, pp. 159-169.
- Tomlin, C. D., 1992. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Trubin, S., 2006. Information space mapping with adaptive Voronoi Diagrams. Master Thesis, Department of Computer Science, Oregon State University: Corvallis, OR.
- Valderrábano, J., 1991. Utilización de las rastrojeras de cereal por el ganado ovino. *Actas de la XXXI R. C. de la SEEP*, Murcia, España, pp. 368-372.



- Vargas-Suárez, L.; Ríos-Mercado, R. Z.; López, F., 2005. Usando GRASP para resolver un problema de definición de territorios de atención comercial. En *Proceedings of the IV Spanish conference on metaheuristics, evolutionary and bioinspired algorithms (MAEB)*. Arenas M. G., Herrera F., Lozano M., Mereño J. J., Romero G., Sánchez AM (Eds.), Granada, España, Septiembre 2005, pp. 609–17.
- Vera y Vega, A.; Fernández de Mesa, J., 1987. Valor nutritivo y aprovechamiento de rastrojeras por el ganado ovino. *Archivos de Zootecnia*, vol. 36, pp. 237-252.
- Vickrey, W., 1961. On the prevention of gerrymandering. *Political Science Quarterly*, vol. 76, pp. 105-110.
- Weise, T., 2009. Global Optimization Algorithms –Theory and Application–. Version: 2009-06-26. Disponible en: <http://www.it-weise.de/> (fecha de acceso: 11/03/2010).
- Williams, J. C., 1995. Political districting: A review. *Papers in Regional Science: The Journal of the Regional Science Association International*, vol. 74, pp.13-40.
- Williams, J. C., 2002. A zero-one programming model for contiguous land acquisition. *Geographical Analysis*, vol. 34, n° 4, pp. 330-349.
- Wright, J.; ReVelle, C.; Cohon, J., 1983. A multiple objective integer programming model for the land acquisition problem. *Regional Science and Urban Economics*, vol. 13, pp.31-53.
- Yagiura, M.; Ibaraki, T., 2000. On Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization Problems. *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, vol. J83-D-1, n° 1, pp. 3-25.
- Zaloom, V. A., 1982. An Automated Procedure to Establish Workzone Boundaries for Air Force Facilities Maintenance Operations. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 33, n° 10, pp. 913-919.
- Zoltners, A. A.; Sinha, P., 1983. Sales territory alignment: A review and Model. *Management Science*, vol. 29, pp. 1237-1256.
- Zoltners, A. A.; Sinha, P., 2001. Sales-Force decision models: Insights from 25 years of implementation. *Interfaces*, vol. 31, n° 3, pp. S8-S44.



7. APÉNDICES



“All that's not given is lost”
(Ánonimo)



7 APÉNDICES

7.1 Apéndice 1: Índices de configuración y composición del paisaje

El *paisaje* puede definirse como el conjunto total de datos de un entorno o territorio, definido por un *recubrimiento continuo* formado por un *conjunto de “parches”*. Un *parche* es un *recinto conexo homogéneo*, es decir, que pertenece a una *determinada clase* o ecosistema. En nuestro caso de estudio, *cada polígono de pasto* será un *territorio* o entorno independiente, donde sólo se considerarán *dos clases*: terreno (1) accesible o (0) inaccesible al ganado.

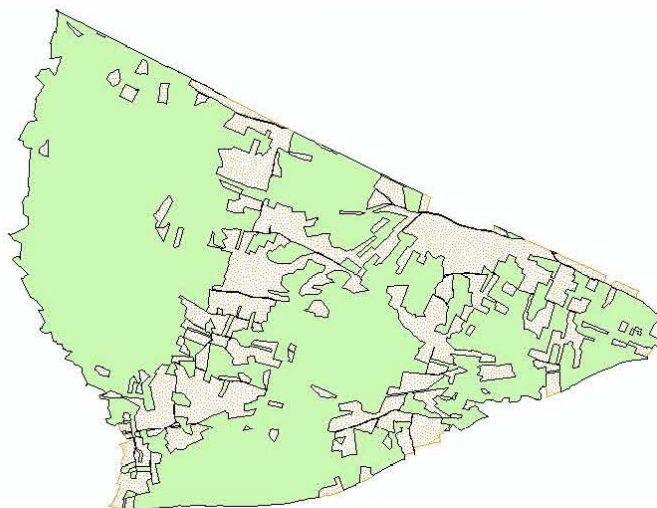


Figura 145. Entorno definido por un polígono de pasto en el que se consideran dos clases: zona accesible (color verde) y no accesible al ganado.

Los índices relacionados con este tema se pueden aplicar en 3 ámbitos diferentes:

- Análisis o métrica del paisaje. El estudio se aplica a todo el entorno o conjunto de datos, sin valorar la clase a la que pertenecen. En este ámbito sólo se tiene en cuenta la distribución de los parches en el conjunto, es decir, en el interior del territorio.
- Análisis o métrica de clases. En este ámbito se estudia, de cada clase, el conjunto de todos sus parches en el entorno de trabajo.
- Análisis o métrica de parches. En este ámbito se estudia el número de parches de una clase, que es una medida simple del grado de subdivisión o fraccionamiento de ésta. El valor interpretativo de este índice es limitado, ya que no transmite información sobre la superficie, la distribución o la densidad de los parches.

De todos los índices existentes, sólo se describen los seleccionados para analizar los polígonos de pasto.



a) Índice de Contagio -métrica del paisaje-

El valor de este índice se calcula con la siguiente expresión:

$$Contagio = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^s \left[(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^s g_{ik}} \right) \right] \cdot \left[\ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^s g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(s)} \right] \times 100$$

- P_i : probabilidad de que el paisaje o territorio esté ocupado por parches de la clase i .
- g_{ik} : número de adyacencias entre recintos o parches de las clases i y k . Si el territorio se representa en una estructura raster, esta variable hace referencia al número de uniones entre celdas de las clases i y k , según el método de la doble cuenta.
- s : número de clases presentes en el territorio.

El rango de valores de este índice está comprendido en el intervalo $(0 \dots 100]$. El contagio se aproxima a cero cuando el número de parches de las diferentes clases es muy elevado y están totalmente intercalados en el territorio. En el caso extremo, si el territorio se representara en una estructura raster, cada celda del territorio sería de una clase diferente y las proporciones del número de adyacencias entre dos clases, g_{ik} , serían muy similares. Si el valor de contagio es 100, los parches están totalmente agregados, por ejemplo, cuando el paisaje consta de un único parche o recinto. Si el número de clases es menor que 2, el contagio está indefinido.

El contagio está inversamente relacionado con la densidad límite. Cuando ésta es muy baja, por ejemplo, si una sola clase ocupa un gran porcentaje del territorio, el contagio es grande, y viceversa. Además, este índice está afectado por la dispersión y el intercalado de los parches de clases diferentes. El valor de contagio es elevado si los niveles de dispersión e intercalado de parches son bajos, y viceversa.

En el gráfico siguiente se muestran dos polígonos de pasto muy diferentes respecto al número y distribución de los parches de las clases no accesible y accesible al ganado. A medida que este número crece y los recintos de ambas clases se distribuyen por todo el territorio de forma intercalada, el índice de contagio disminuye su valor. Obsérvese la diferencia de valor entre el polígono (a), contagio = 44, y el (b), contagio = 97.

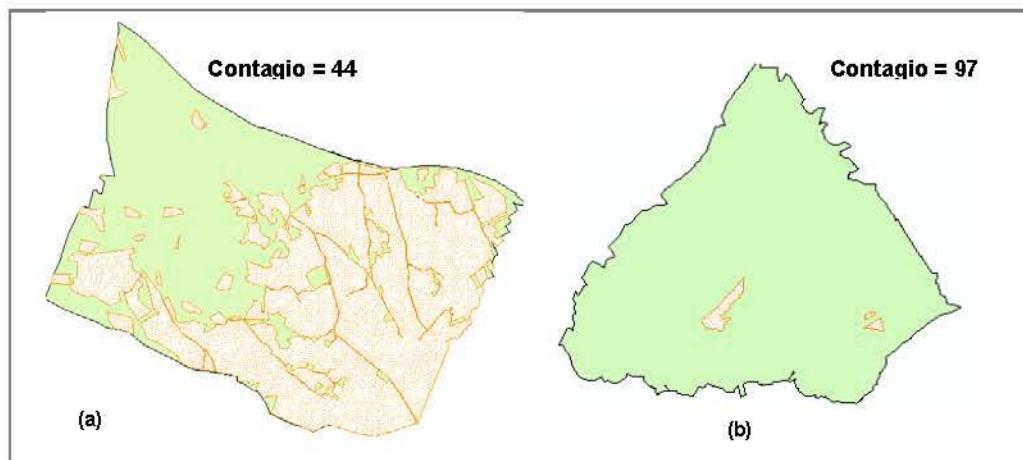


Figura 146. Ejemplos del valor del índice de contagio en un territorio con dos clases.

b) Índice de División -métrica del paisaje-

El valor de este índice se calcula con la siguiente expresión:

$$División = \left[1 - \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \left(\frac{área_{ij}}{Área} \right)^2 \right]$$

- $área_{ij}$: área, expresada en m^2 , del parche j de la clase i .
- $Área$: área total del territorio (expresada en m^2).
- s : número de clases presentes en el territorio.
- t : número de parches de una clase.

El rango de valores de este índice está comprendido en el intervalo $(0...1]$. La división se aproxima a cero cuando el territorio consta de un único parche. Por el contrario, a medida que el territorio está más subdividido o fragmentado en parches diferentes, el índice incrementa su valor.

Si el territorio se representara espacialmente en una estructura raster, el valor de división sería máximo cuando cada celda del recubrimiento fuera un parche independiente.

Este índice está basado en la distribución acumulativa del área de los parches. En un modelo raster se interpreta como la probabilidad de que dos celdas del recubrimiento, seleccionadas de forma aleatoria, no estén situadas en el mismo parche.

Los polígonos de pasto de la figura siguiente presentan características muy diferentes, por lo que el rango de valores del índice está en el intervalo $[0.05 \dots 0.71]$. El territorio del polígono 4 apenas está fragmentado, por tanto, la probabilidad de que dos puntos elegidos al azar no pertenezcan al mismo recinto o parche es muy baja y su índice toma el valor mínimo del conjunto (0.05). La mayor fragmentación del territorio en el polígono 36 y su elevado número de parches hace que esta probabilidad sea superior y, en este caso, su índice sea el máximo de todos (0.71).

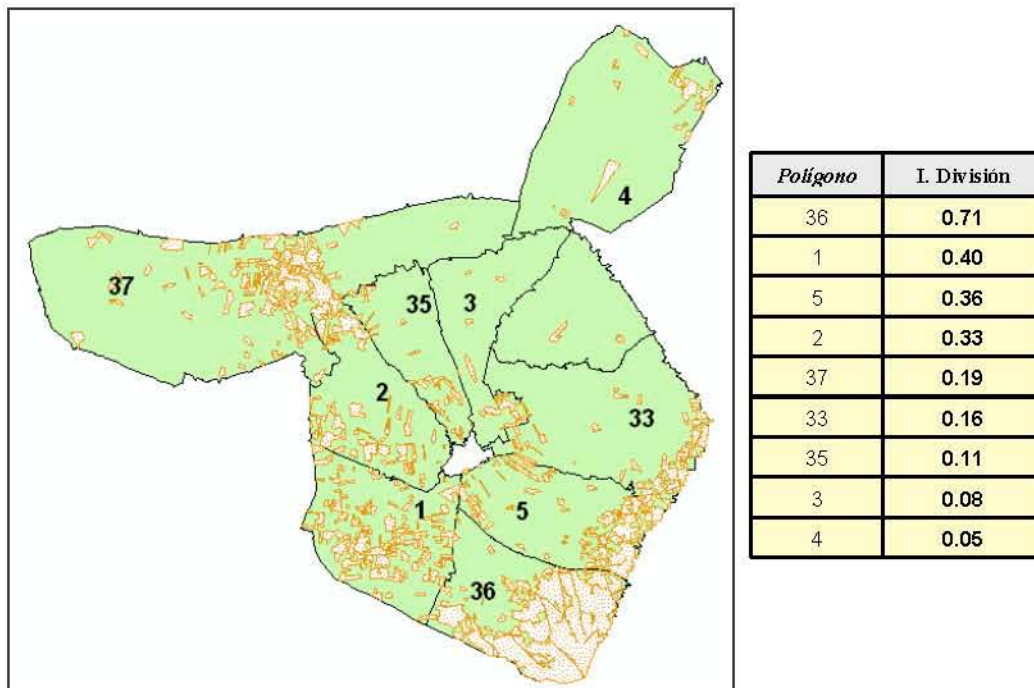


Figura 147. Ejemplos del valor del índice de división en varios territorios (polígonos de pasto) estructurados en dos clases.

c) Índice de Fragmentación (o Split) -métrica de clases-

El valor de este índice para una determinada clase i se calcula con la siguiente expresión:

$$Split_{clase_i} = \frac{\text{Área}^2}{\sum_{j=1}^t \text{área}_{ij}^2}$$

- área_{ij} : área, expresada en m^2 , del parche j de la clase i .
- Área: área total del territorio (expresada en m^2).
- t : número de parches de la clase i presentes en el territorio.

El rango de valores de este índice está comprendido en el intervalo $(0 \dots N^2]$. Si el territorio se representara espacialmente en una estructura raster, N sería el número total de celdas que ocupa el recubrimiento. El índice de una clase toma valor 1 cuando el territorio está ocupado por un solo parche de esta clase y, se va incrementando, cuando dicha clase se compone de un mayor número de parches de superficie mínima.

El índice de fragmentación se basa en la distribución acumulativa del área de los parches de una clase, y se interpreta como el número de parches que tienen un mismo tamaño.



Si se analiza el valor de este índice, para la clase “zona accesible al ganado”, en los diferentes polígonos de pasto (territorios) del gráfico siguiente, se observa que los máximos valores corresponden a los polígonos 25, 10, 9, 26 y 28. En todos ellos, el número de recintos independientes o parches de esta clase es mayor que en el resto de polígonos, y la superficie que ocupa cada uno de ellos no es homogénea, existiendo diferencias de tamaño. Por el contrario, los polígonos 21 y 11 están prácticamente ocupados por un solo parche de la clase citada, por lo que el valor del índice es mínimo.

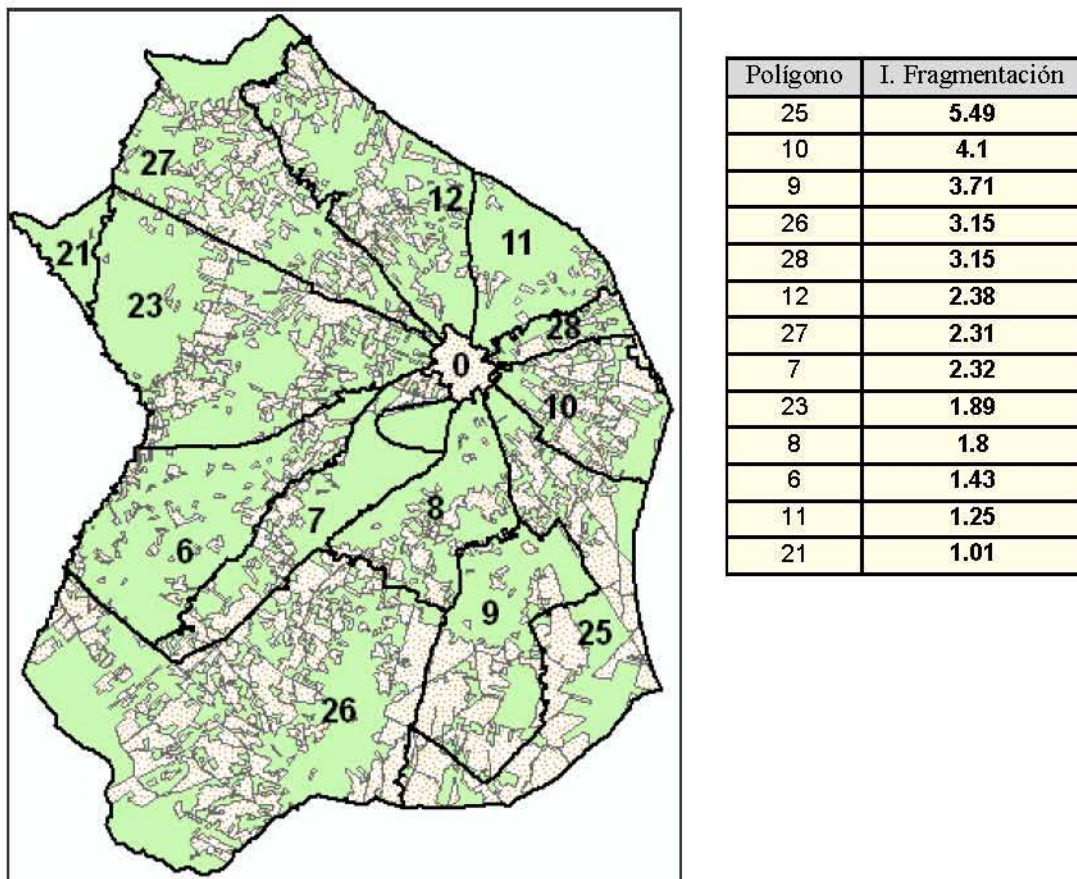


Figura 148. Ejemplos del valor del índice de fragmentación de la clase “zona accesible” (color verde) en diferentes territorios (polígonos de pasto).

d) Índice de Cohesión -métrica clases-

El valor de este índice para una clase determinada se calcula con la siguiente expresión:

$$Cohesión_{clase\ i} = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^t pm_{ij}}{\sum_{j=1}^t pm_{ij} \sqrt{área_{ij}}} \right] \times \left[1 - \frac{1}{\sqrt{Área}} \right]^{-1} \times (100)$$

- pm_{ij} : perímetro (m) del parche j de la clase i.
- $área_{ij}$: área total (m^2) del parche j de la clase i.
- Área: área total del territorio (m^2).
- t: número de parches de la clase i presentes en el territorio.

El rango de valores de este índice está comprendido en el intervalo (0...100]. Este índice se aproxima a cero cuando se cumplen las condiciones siguientes:

- La clase está muy subdividida en parches.
- La superficie del territorio que separa unos parches de otros es mínima.

El índice de cohesión de una clase mide la conectividad física entre sus parches, de modo que su valor aumenta si estos recintos están más próximos y son adyacentes entre sí.

En el gráfico siguiente se muestran tres polígonos de pasto muy diferentes respecto al número y distribución de los parches de la clase accesible al ganado (color verde). A medida que este número crece y los recintos se distribuyen por todo el territorio aumentado el espacio de separación entre ellos, el valor del índice disminuye. Obsérvese la diferencia entre los polígonos (a), cohesión = 99.9996, (b), cohesión = 99.98, y (c), cohesión = 99.90.

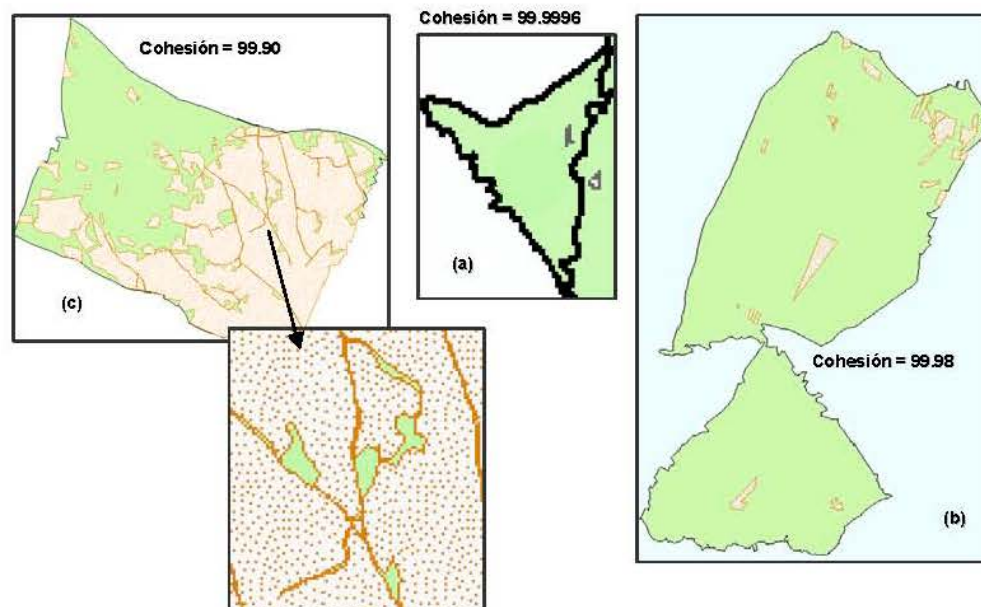


Figura 149. Ejemplos del valor del índice de cohesión de la clase “zona accesible” (color verde) en 3 territorios.



e) Índice de agregación -métrica de clases-

El valor de este índice para una clase determinada, representada en una estructura raster, se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Agregación}_{\text{clase } i} = \left[\frac{g_{ii}}{\max(g_{ii})} \right] \times (100)$$

- g_{ii} : número de adyacencias entre píxeles de la clase i .
- $\max(g_{ii})$: número máximo de adyacencias entre píxeles de los parches de la clase i .

El rango de valores está comprendido en el intervalo (0...100]. Este índice se aproxima a cero cuando la clase está formada por parches totalmente dispersos. Su valor aumenta cuanto mayor es el número de parches adyacentes, y es igual a 100 cuando todos los parches son contiguos, es decir, la clase consta de un solo parche o recinto conexo.

El índice de agregación de una clase, en una estructura raster, se calcula a partir de una matriz de adyacencia que indica:

- el número de píxeles adyacentes a píxeles de cada una de las otras clases, y
- el número de píxeles adyacentes a píxeles de su misma clase.

En el gráfico siguiente se muestran los valores de agregación de la clase ‘accesible al ganado’ (color verde) de un conjunto de polígonos de pasto. El valor del índice es elevado en todos los polígonos dado que esta clase se compone de un número no muy elevado de parches en cada uno de ellos. A medida que aumenta la adyacencia entre estos recintos, dando lugar a un menor número de parches, el valor de agregación se hace mayor. Obsérvese la diferencia entre los polígonos 12 -agregación = 99.0- y 38 -agregación = 99.43-.

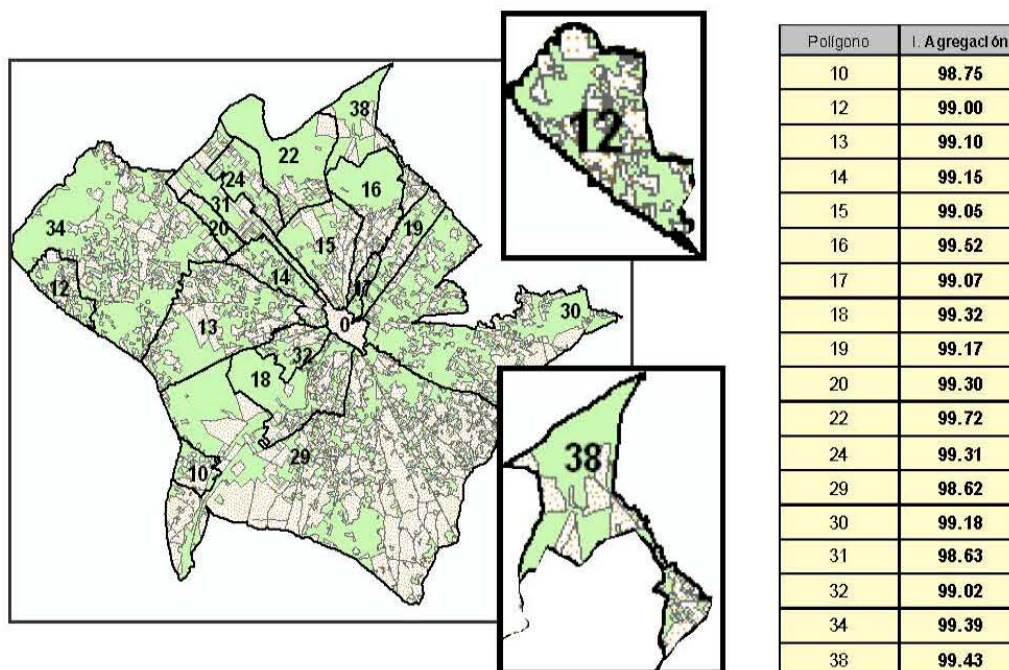


Figura 150. Ejemplos del valor del índice de agregación de la clase “zona accesible” (color verde) en varios territorios.



Las pruebas de los índices de configuración y composición del paisaje en los polígonos del área de estudio se hicieron con el programa de distribución gratuita Fragstats V3.3³ (Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps -University of Massachusetts Amherst-).

Una vez analizados los resultados del experimento, se llega a las siguientes conclusiones:

- En la métrica del paisaje, los índices pueden clasificarse en dos grupos, según su grado de idoneidad para analizar la distribución y configuración geométrica de los dos tipos de parcelas, accesibles y no accesibles al ganado, en el polígono de pasto. En el primer grupo se encuentran los índices de contagio y de división. En el segundo, el índice de fragmentación cuyo uso debería ser más restrictivo, estudiando cuidadosamente sus resultados.
- En la métrica de clases, y sólo para la clase de parcelas accesibles al ganado, los índices que permiten analizar la distribución de este tipo de parcelas en el polígono de pasto son: cohesión y agregación.

La siguiente tabla muestra qué valores han de tener los índices para seleccionar los polígonos de pasto mejores. Esta selección indica que, desde el punto de vista de la eficiencia energética, la distribución de las parcelas accesibles al ganado en su interior es más idónea.

TIPO DE MÉTRICA	INDICES				
	Contagio	División	<i>Fragmentación</i>	Cohesión	Agregación
Paisaje	Máximo	Mínimo			
Clase (‘accesible al ganado’)			<i>Mínimo</i>	Máximo	Máximo

Tabla 51. Tabla con los valores de los índices, de configuración y composición del paisaje, más adecuados para analizar la eficiencia energética de los polígonos de pasto.

A continuación se muestra un ejemplo de los valores de estos índices en los polígonos de pasto del municipio de Lillo. Según la tabla anterior, los polígonos 11, 21 y 6 son los que presentan una buena distribución de las parcelas accesibles al ganado en su interior.

³ • Web programa Fragstats: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.

• Guía de usuario programa Fragstats:

<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/User%20guidelines/User%20guidelines%20content.htm>



Polígono	I. Contagio	Polígono	I. Dmsión	Polígono	I. Fragmentación
10	44,71	21	0,01	21	1,01
28	46,24	11	0,2	11	1,25
26	46,38	6	0,3	6	1,43
25	46,69	8	0,44	8	1,8
9	48,43	23	0,47	23	1,89
12	49,06	27	0,55	27	2,31
27	49,43	7	0,56	7	2,32
7	50,57	12	0,57	12	2,38
23	54,12	28	0,65	26	3,15
8	55,58	26	0,67	28	3,15
6	64,89	9	0,71	9	3,71
11	73,75	10	0,74	10	4,1
21	97,57	25	0,79	25	5,49

Polígono	I. Cohesión	Polígono	I. Agregación
28	99,940	10	98,469
10	99,957	25	98,688
25	99,964	28	98,790
9	99,964	26	99,042
7	99,972	27	99,057
12	99,981	12	99,116
27	99,984	7	99,135
26	99,985	9	99,272
8	99,985	8	99,334
23	99,990	23	99,357
6	99,993	6	99,520
11	99,994	11	99,671
21	99,999	21	99,750

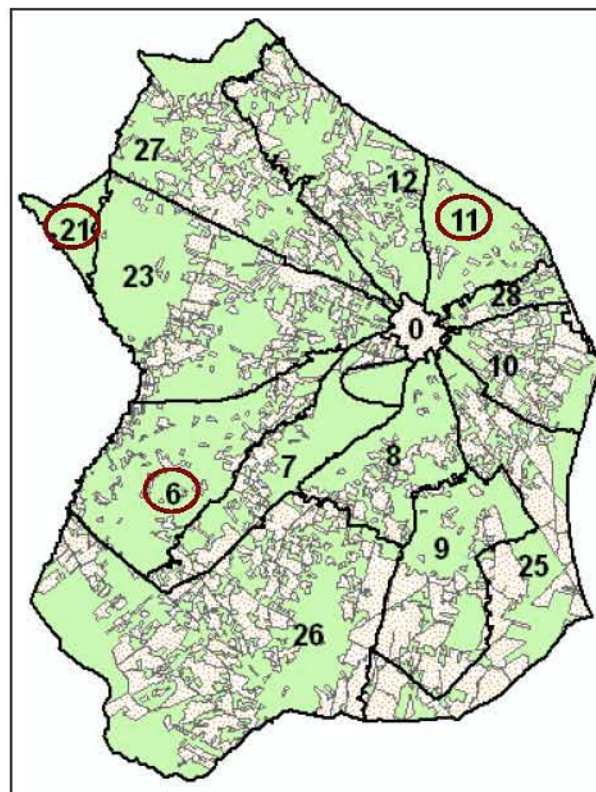


Figura 151. Ejemplos del valor del índice de agregación de la clase “zona accesible” (color verde) en varios territorios.



7.2 Apéndice 2: Manual de la aplicación

La finalidad de esta sección es describir la interfaz de la aplicación desarrollada⁴, de modo que pueda utilizarse como manual de usuario.

7.2.1 Entrada de datos

Una vez iniciada la aplicación, se muestra la ventana general de acceso o ventana principal. Esta consta de una barra de menús con tres opciones disponibles: **Archivo**, **Análisis y Ventana**. Al principio, el único menú disponible es el de **Archivo**, que incluye los submenús correspondientes a: **Abrir, Nuevo y Salir**.

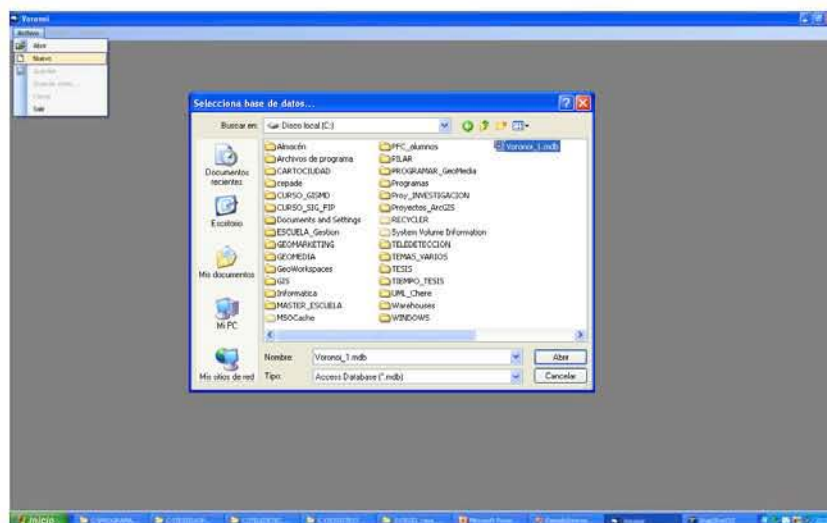


Figura 152. Ventana general de acceso a la aplicación.

La opción **Nuevo** permite la creación de un proyecto de zonificación. Tras seleccionar este menú se abre una ventana desde la cual es posible elegir un fichero de Microsoft Access (*.mdb), que contendrá la información de las unidades básicas que se utilizarán en el proceso de agrupación espacial. Este fichero tiene que haber sido creado con el programa GeoMedia Professional.

Una vez elegido el archivo de base de datos, se muestra el cuadro de diálogo de la figura 153, desde el que se introduce la información requerida por el programa para realizar una zonificación.

⁴ Se trata de una aplicación de escritorio estándar, como pudiera ser cualquiera de los programas de Microsoft Office.



Figura 153. Ventana de parámetros iniciales del conjunto de datos de entrada a la aplicación.

En los campos del cuadro de diálogo se introducen los datos siguientes:

- **Tabla:** tabla de la base de datos donde se encuentra la información de las unidades básicas de la zona de estudio. Al hacer clic en la flecha de la barra deslizante, el programa muestra todas las tablas existentes en la base de datos, permitiendo al usuario seleccionar una de ellas.

En los otros campos del cuadro de diálogo, el usuario ha de elegir la opción deseada de la lista que se despliega en la correspondiente barra deslizante. Esta lista muestra las columnas de que se compone la tabla seleccionada.

- **Campo identificador:** columna de la tabla que realiza la función de clave primaria. Este campo ha de contener un valor numérico que permita identificar de manera única cada una de las unidades básicas contenidas en dicha tabala.
- **Campo FAE:** columna de la tabla que contiene los valores del atributo de medida usado para determinar el tamaño de las zonas. En la aplicación destinada a la gestión de los sistemas agropecuarios extensivos, este campo contiene los datos de la superficie forrajera equivalente de cada unidad básica (parcela).
- **Campo Superficie:** columna de la tabla que contiene la superficie de cada una de las unidades básicas.
- **Campo Geometría:** columna de la tabla que contiene la información correspondiente a la geometría de cada una de las unidades básicas.
- **Campo Uso:** columna de la tabla que contiene los valores del uso de suelo a que se destina cada unidad básica. Esta selección condiciona la lista de valores que aparecerá en el campo siguiente (“Valor para vías”).
- **Valor para vías:** el valor que se seleccione servirá para identificar el uso de suelo asociado a las unidades que forman parte de la red viaria. Este dato sólo tiene validez para la aplicación destinada a la gestión de los sistemas agropecuarios extensivos.



- ✓ **No realizar preproceso:** casilla de control que permite al usuario indicar si, antes de calcular una zonificación con el conjunto de datos seleccionado, el programa ha de realizar el proceso de fusionar la geometría de las unidades del viario con sus parcelas adyacentes, conservando los atributos correspondientes a éstas últimas. La opción es exclusiva de la aplicación destinada a la gestión de los sistemas agropecuarios extensivos. Inicialmente fue diseñada para disminuir el número total de unidades a procesar y aumentar el rendimiento del programa. Si el usuario desea tener un conocimiento exhaustivo, en cada región (polígono de pasto), de las unidades a las que el ganado realmente puede acceder, entonces no se debe usar esta opción. Si se activa la función de preproceso, las unidades del viario desaparecen, interfiriendo en el cómputo de las parcelas de pasto inaccesibles. El valor calculado será superior al número real de parcelas de este tipo, lo que afectará también al cálculo de la superficie forrajera ajustada de cada una de las regiones o polígonos de pasto.

A continuación se muestra el cuadro de diálogo que se visualiza según se haya (a) marcado o (b) no la opción de “No realizar preproceso”.

Introduzca la siguiente información:

Tabla: Parc_vias_romeral

Campo identificador: ID_romeral

Campo FAE: FAE

Campo superficie: Sup_Ha

Campo geometría: Geometry

Campo Uso:

Valor para vías:

☒ No realizar preproceso

(a) Aceptar Cancelar

Introduzca la siguiente información:

Tabla: Parc_vias_romeral

Campo identificador: ID_romeral

Campo FAE: FAE

Campo superficie: Sup_Ha

Campo geometría: Geometry

Campo Uso: USO

Valor para vías: VIAS

☐ No realizar preproceso

(b) Aceptar Cancelar

Figura 154. Controles de diálogo con el conjunto de datos de entrada a la aplicación, según se (a) seleccione o (b) no la opción “No realizar preproceso”.



7.2.2 Proceso de datos

Una vez que se ha introducido la información de partida, se procede a calcular los centroides de cada una de las unidades básicas del conjunto de datos. Si la opción “*No realizar preproceso*” está marcada, la aplicación fusionará las unidades del viario con las unidades adyacentes antes de obtener los centroides. Mientras se realizan estos procesos, se van mostrando diferentes ventanas con mensajes que indican las acciones que está ejecutando el programa.

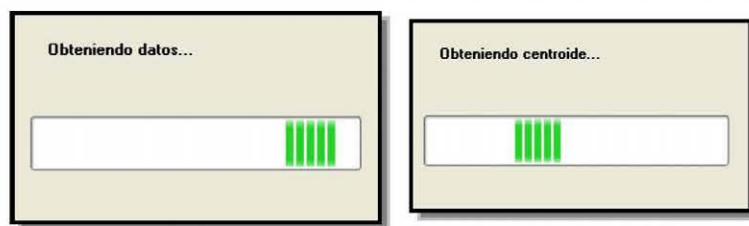


Figura 155. Ventanas con información sobre las acciones que realiza la aplicación tras introducir los datos de entrada.

Al concluir las fases de carga de datos y cálculo de parámetros iniciales, ya es posible generar las zonificaciones o particiones que el usuario desee. Para cada una de ellas, la aplicación solicita un nombre que hay que introducir en un cuadro de diálogo, donde se usa el término “análisis” para referirse a una zonificación. Si se van a realizar varios procesos de partición, es recomendable que este nombre sea evocador para identificar posteriormente cada uno de ellos.

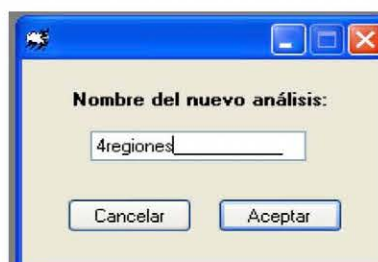


Figura 156. Cuadro de diálogo para introducir el nombre que se asignará a la zonificación que va calcularse.

Tras especificar el nombre de la zonificación, se muestra una ventana de gráficos donde se introducen los datos necesarios para realizar el cálculo. Este tipo de ventanas están divididas en dos secciones: la gráfica, donde se puede visualizar información espacial en formato vectorial⁵, y la alfanumérica, donde se sitúan una serie de botones para interactuar con la aplicación y se muestran e introducen un conjunto de valores temáticos.

⁵ En las secciones siguientes también se usará el término “mapa” para hacer referencia a la información espacial que se visualiza en la ventana de gráficos.



7.2.2.1 Ventana de gráficos

En la ventana de gráficos se muestran los campos siguientes:

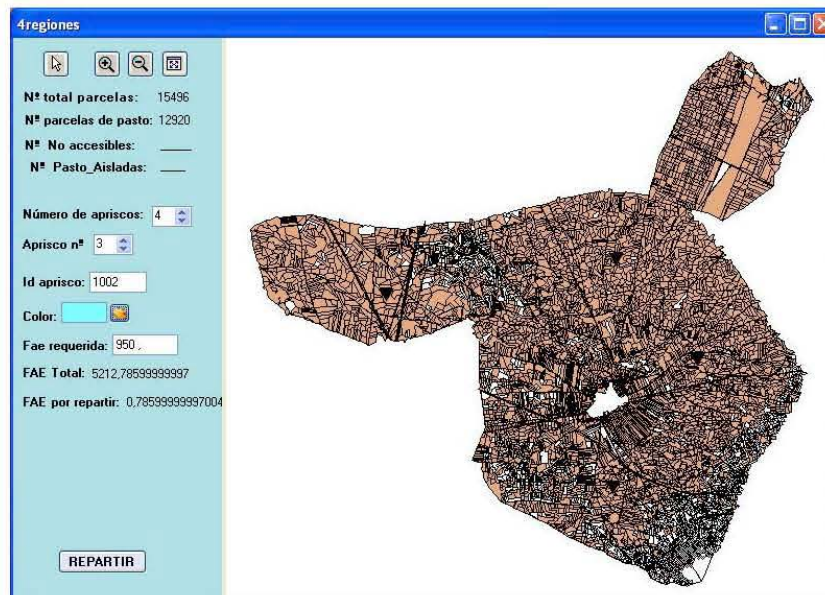


Figura 157. Ventana de gráficos donde se visualiza la información espacial y se introducen los valores de los parámetros necesarios para realizar una zonificación.

- **Nº total de parcelas:** campo, no editable, que indica el total de unidades básicas (parcelas) existentes en la zona de estudio.
- **Nº de parcelas de pasto:** campo, no editable, que indica el total de parcelas que son un recurso pastoral en la zona de estudio. Estas parcelas son las que tiene aprovechamiento forrajero para el ganado.
- **Nº (parcelas) No accesibles:** campo, no editable, en el que la aplicación visualizará el número de parcelas que no son un recurso pastoral en la zona de estudio y están vedadas al ganado.
- **Nº (parcelas) Pasto aisladas:** campo, no editable, en el que la aplicación visualizará el número de parcelas que, siendo un recurso pastoral en la zona de estudio, resultan inaccesibles al ganado. Este dato se calcula en el análisis y se visualiza una vez que se ha realizado la zonificación.
- **Número de apriscos:** el número de semillas o generadores que darán lugar a las regiones o polígonos de pasto.




- **Aprisco n°:** identificador interno del generador. El programa asigna automáticamente los valores a este campo.
- **Id. aprisco:** número identificador de la parcela que contiene el aprisco (generador). La entrada podrá ser tanto gráfica, seleccionando en la ventana dicha parcela, como numérica, introduciendo el correspondiente número identificador. A partir de esta información, el programa visualizará la localización del aprisco con un triángulo negro. La aplicación no permite la selección de una parcela no accesible al ganado.
- **Color:** el usuario ha de seleccionar el color con el que se visualizará la región (polígono de pasto) asociada a dicho aprisco. Esta selección se realiza en una paleta de colores que se despliega al hacer clic en el control .







Figura 158. Tabla de colores.

- **F AE requerida:** valor⁶ correspondiente a la superficie forrajera equivalente que ha de tener el polígono de pasto que se generará en torno a un determinado aprisco. El programa ha de generar un polígono con un tamaño de, al menos, el 90% del valor especificado por el usuario en este campo. La FAE es el atributo de medida en la aplicación destinada a la gestión de los sistemas agropecuarios extensivos.
- **F AE Total:** la aplicación visualiza automáticamente el valor del atributo de medida correspondiente a toda la zona de estudio que, en los sistemas agropecuarios extensivos, corresponde al tamaño o superficie forrajera equivalente total. Este campo no es editable.
- **F AE por repartir:** este campo, no editable, indica la superficie forrajera equivalente de la zona de estudio que está disponible, es decir, que no ha sido asignada a ningún polígono de pasto.

⁶ El valor indicado en este campo corresponde al tamaño objetivo de la región que se generará en torno a un determinado generador. Este valor se expresa en las unidades del atributo de medida elegido.



En la parte alfanumérica de la ventana de gráficos se sitúan cuatro botones que realizan las siguientes funciones:

-  Selección de unidades espaciales (parcelas). Se usa para indicar las unidades que contienen los generadores (apriscos).
-  Zoom de aumento. Se usa para acercar el mapa centrando la vista en la zona en la que se haya hecho clic con el ratón. Permite visualizar la información espacial con el grado de detalle deseado.
-  Zoom de alejamiento. Se usa para alejar el mapa centrando la vista en la zona donde se haya hecho clic con el ratón.
-  Encuadre del mapa en el espacio de la ventana. Calcula la extensión geográfica que ocupa el mapa y ajusta el nivel de zoom para que se visualice la totalidad de dicha zona en la ventana.

Una vez que se ha introducido la información referente a los generadores (identificación de cada aprisco, tamaño de su correspondiente polígono de pasto y color de visualización), se pulsa el botón **Repartir** para iniciar el cálculo de la zonificación. El tiempo invertido en el proceso dependerá del número de unidades, del número y localización de los generadores y del tamaño asignado a sus correspondientes regiones. Mientras se realiza el cálculo, la aplicación muestra una ventana con información sobre las acciones que realiza en cada momento.

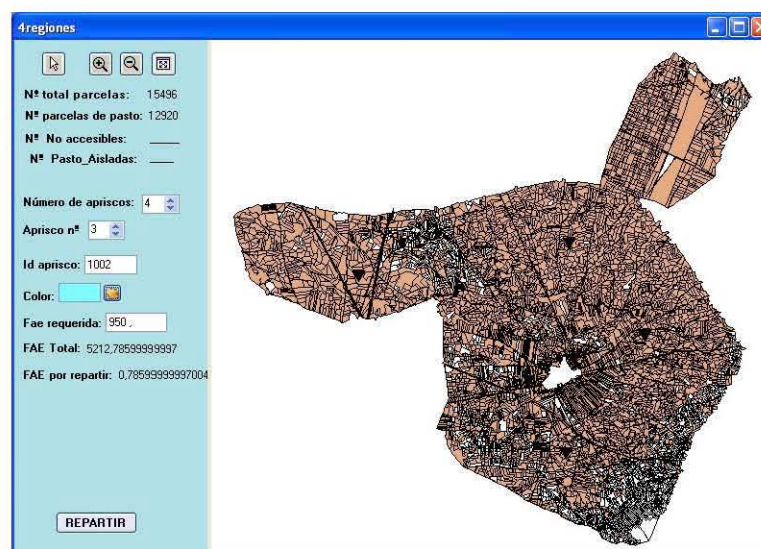


Figura 159. Ventana con información sobre las acciones que realiza el programa mientras se calcula una zonificación.



Antes de visualizar la solución generada, se muestra un cuadro de diálogo para que el usuario indique si el programa ha de realizar o no una fase de postproceso. Esta fase se diseñó inicialmente para detectar regiones no conexas y poder corregir sus geometrías hasta formar recintos que cumplieran dicha condición⁷. El usuario puede obviar esta fase en los procesos de análisis, ya que, con el algoritmo utilizado, se ha demostrado que todas las regiones generadas son conexas. No obstante, su uso puede ser de utilidad en experimentos realizados en otros ámbitos de aplicación con diferentes conjuntos de datos.

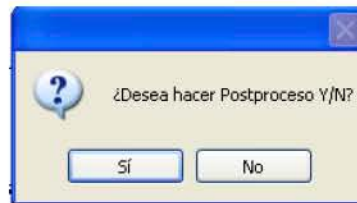


Figura 160. Cuadro de diálogo para seleccionar o no la fase de postproceso.

En función de la opción elegida, el programa realizará o no el proceso para detectar y corregir las regiones no conexas de la partición generada con el diagrama de Voronoi.

⁷ Véase el capítulo 3.4 “Presentación del nuevo modelo de solución”.



7.2.3 Presentación de resultados

Una vez que se ha generado la solución, ésta se muestra en la correspondiente ventana de gráficos. Las zonas se visualizarán con el color elegido anteriormente para cada una de ellas, pudiendo diferenciarse las parcelas no transitables por el ganado, tono oscuro, de las que sí lo son, tono claro.

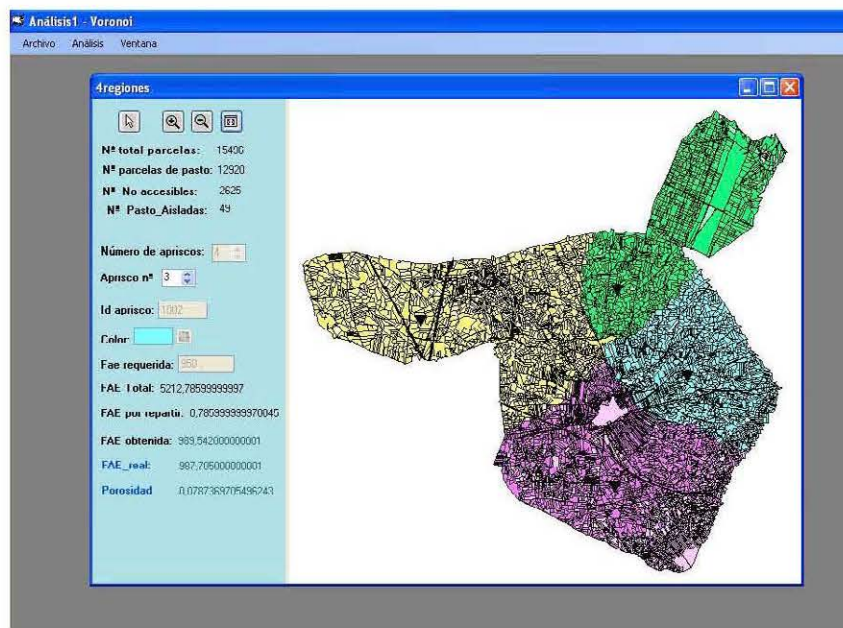


Figura 161. Visualización del resultado de un proceso de zonificación en la ventana de gráficos.

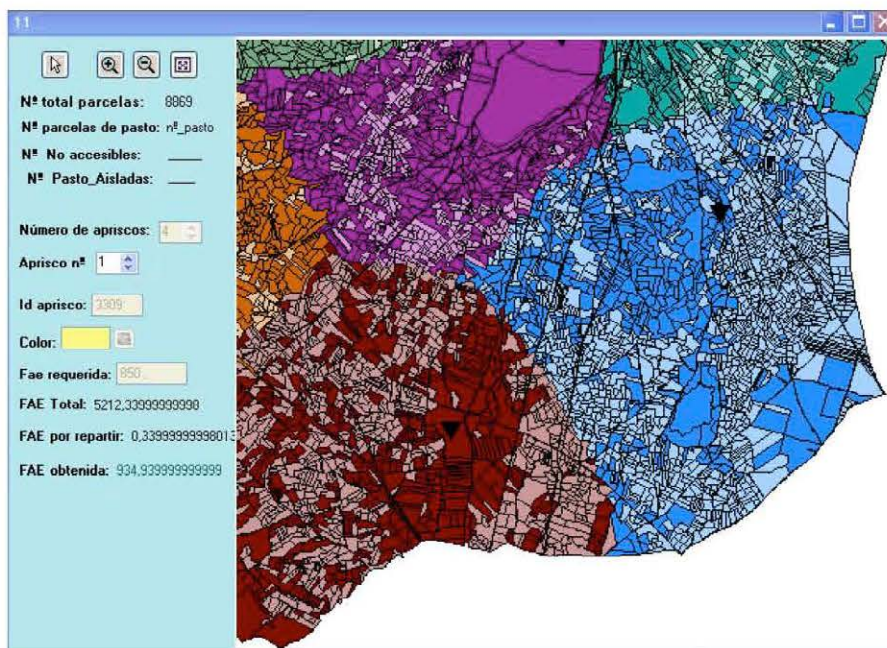


Figura 162. Visualización de una zonificación: uso de tonos claros en parcelas no accesibles y tonos oscuros en parcelas transitables por el ganado.



En la parte alfanumérica de la ventana se muestran los datos iniciales y los valores calculados durante el proceso. Para visualizar la información correspondiente a cada una de las zonas o polígonos, el usuario ha de seleccionar, en el control gráfico etiquetado con “**Aprisco nº**”, el identificador numérico correspondiente a cada uno de ellos. Los datos calculados en la zonificación se muestran en los campos siguientes:

- “**F AE obtenida**”: indica la superficie forrajera equivalente⁸ asignada a la región o polígono de pasto.
- “**F AE real**”: se muestra la superficie forrajera equivalente ajustada del polígono. Se calcula a partir del dato anterior, sustrayendo la FAE correspondiente a las parcelas de pasto que resultan inaccesibles al ganado y no pueden ser usadas como recurso pastoral.
- “**Porosidad**”⁹: se muestra el índice de porosidad global del polígono.

$$Porosidad(z_i) = \frac{\text{Área_No_tránsito}(z_i)}{\text{Área_Tránsito}(z_i)} = \frac{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (1 - \text{acceso}_j)}{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (\text{acceso}_j)}$$

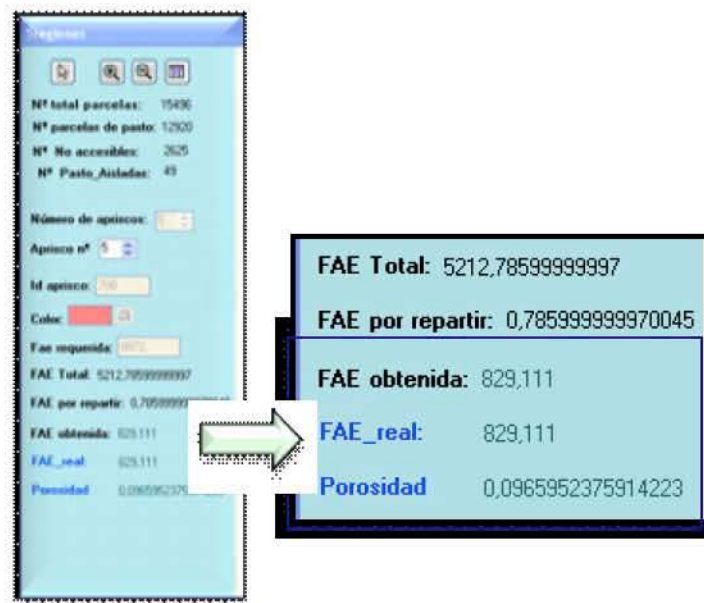


Figura 163. Datos calculados en un proceso de zonificación.

⁸ Fuera del contexto de los sistemas agropecuarios extensivos, en este campo se visualizaría el tamaño calculado para el atributo de medida de la región seleccionada en cada momento.

⁹ Véase la sección 3.4.3 “Implementación del algoritmo”.



En la parte alfanumérica de la ventana se muestran los datos iniciales y los valores calculados durante el proceso. Para visualizar la información correspondiente a cada una de las zonas o polígonos, el usuario ha de seleccionar, en el control gráfico etiquetado con “**Aprisco nº**”, el identificador numérico correspondiente a cada uno de ellos. Los datos calculados en la zonificación se muestran en los campos siguientes:

- “**F AE obtenida**”: indica la superficie forrajera equivalente⁸ asignada a la región o polígono de pasto.
- “**F AE real**”: se muestra la superficie forrajera equivalente ajustada del polígono. Se calcula a partir del dato anterior, sustrayendo la FAE correspondiente a las parcelas de pasto que resultan inaccesibles al ganado y no pueden ser usadas como recurso pastoral.
- “**Porosidad**”⁹: se muestra el índice de porosidad global del polígono.

$$Porosidad(z_i) = \frac{\text{Área_No_tránsito}(z_i)}{\text{Área_Tránsito}(z_i)} = \frac{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (1 - \text{acceso}_j)}{\sum_{x_j \in z_i} \text{Área}_{x_j} \times (\text{acceso}_j)}$$

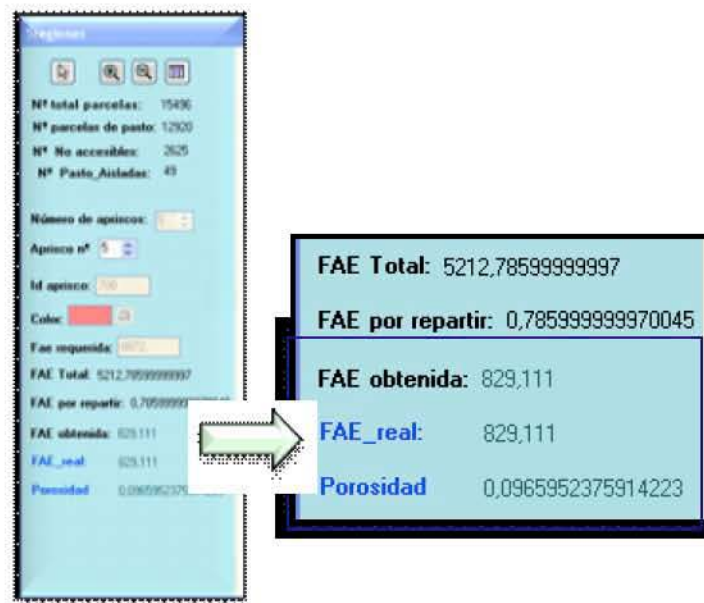


Figura 163. Datos calculados en un proceso de zonificación.

⁸ Fuera del contexto de los sistemas agropecuarios extensivos, en este campo se visualizaría el tamaño calculado para el atributo de medida de la región seleccionada en cada momento.

⁹ Véase la sección 3.4.3 “Implementación del algoritmo”.

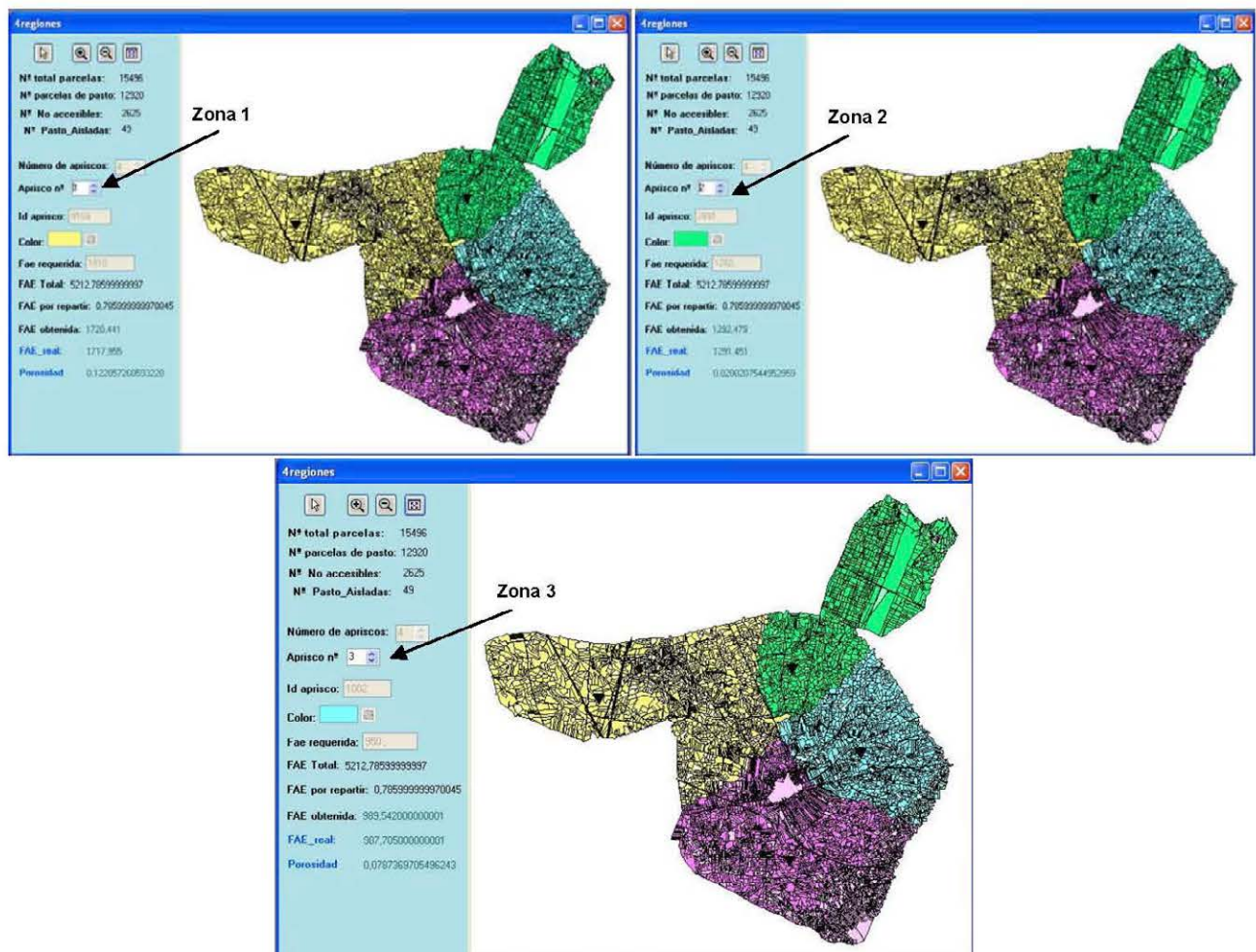


Figura 164. Visualización de los datos específicos de cada una de las regiones de una zonificación.

La ventana correspondiente a cada zonificación contiene los botones de herramientas antes descritos, por lo que es posible acceder a sus funcionalidades así como a las propias de una ventana normal (minimizar, maximizar o cerrar).

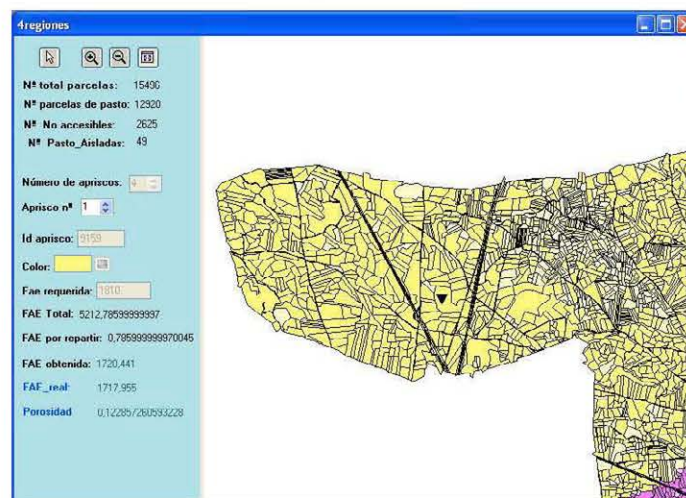


Figura 165. Uso de las herramientas de zoom en la ventana de gráficos de una zonificación.



A partir de un determinado conjunto de unidades básicas, el usuario puede realizar tantas zonificaciones como desee y compararlas posteriormente.

Los datos de entrada y el resultado de cada zonificación se visualizarán, dentro de la ventana principal de la aplicación, en una ventana de gráficos cuyo título será el nombre indicado en el cuadro de diálogo anteriormente descrito.

Para realizar un nuevo proceso de cálculo se selecciona el menú **Análisis > Nuevo**.



Figura 166. Menú para calcular una nueva zonificación a partir de un conjunto de datos existente. Cuadro de diálogo para introducir el nombre que se asignará a dicha zonificación.

Una vez que se introduce el nombre que se quiere asignar a la nueva zonificación que va a calcularse, se repiten los pasos del proceso descrito anteriormente hasta que se visualice la solución en su correspondiente ventana de gráficos.

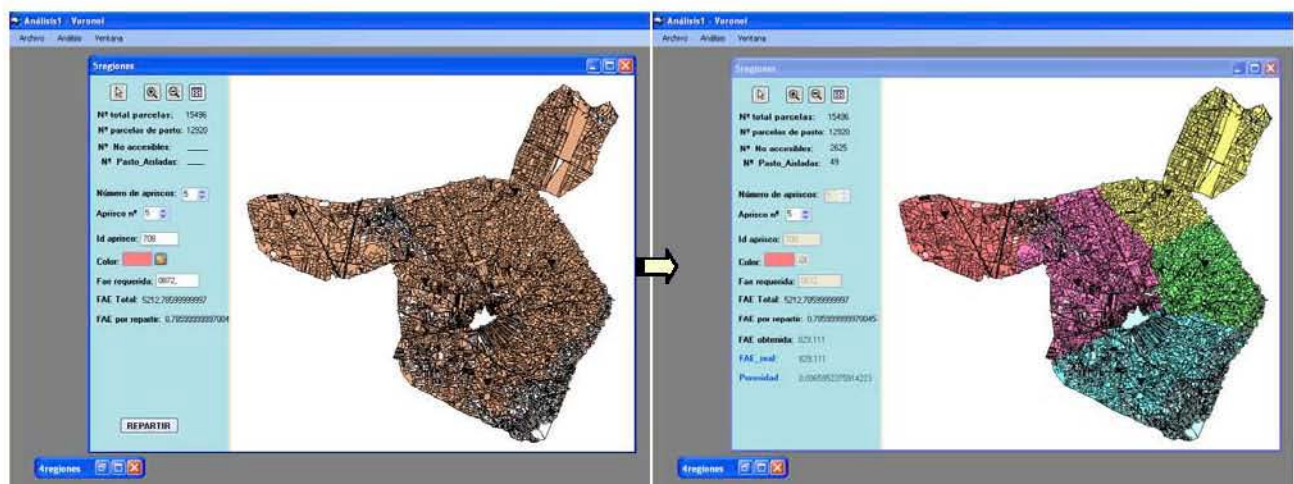


Figura 167. Ventana de gráficos correspondiente a una nueva zonificación, antes y después de calcular la solución.

Hay que tener en cuenta que los resultados de un análisis específico pueden no ser el producto final del proceso de zonificación. Se supone que los mapas y los ficheros Excel generados sirven para guiar al usuario en la elección de la solución más apropiada según los objetivos y condiciones preliminares.

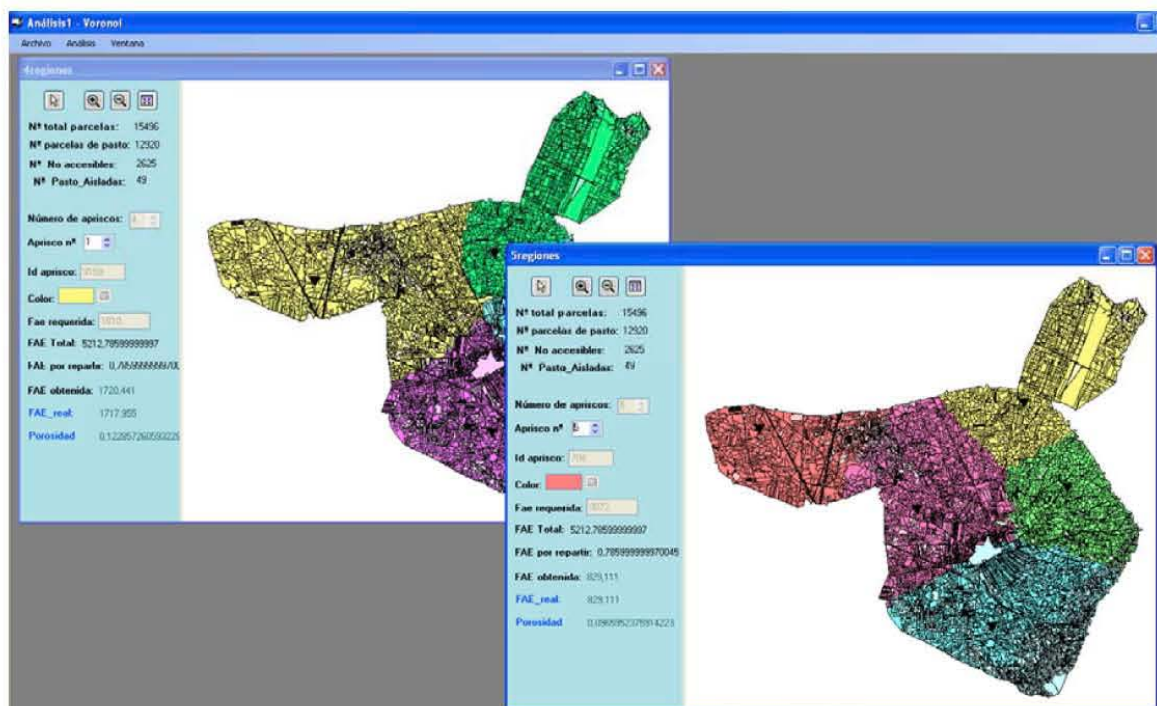


Figura 168. Ventanas de gráficos correspondientes a dos zonificaciones calculadas en la misma sesión y con el mismo conjunto de datos.

A la vista de los resultados obtenidos en cada zonificación, el usuario puede optar por detener el proceso y aceptar dicha solución, o bien por estudiar el grado de ajuste de las diferentes regiones a los criterios de partida e iniciar un nuevo proceso de análisis. En este caso, las modificaciones introducidas en la posición y tamaño de los generadores, puede variar significativamente los nuevos resultados. Al finalizar cada proceso de análisis existe la opción de guardar una copia de los resultados obtenidos hasta ese momento. Si la zonificación generada no es de interés se puede eliminar con la opción **Análisis > Borrar**, para no almacenar sus datos con el resto.

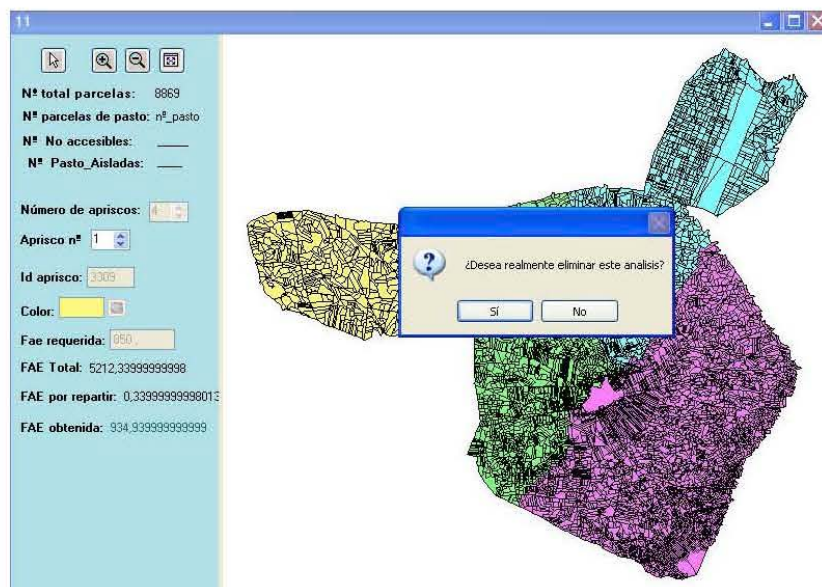


Figura 169. Ventana para eliminar el análisis realizado, al seleccionar el menú Análisis→Borrar.



Una vez calculadas una o varias zonificaciones con el mismo conjunto de datos, es posible guardar los resultados obtenidos para su posterior recuperación. El menú **Archivo> Guardar como** almacena dichos resultados en un fichero con extensión *.tfc*. Si ya se está trabajando sobre un archivo *.tfc* el menú **Archivo > Guardar** actualiza el fichero con los cambios realizados hasta el momento.

Para recuperar las zonificaciones existentes de un conjunto de datos, se usa el menú **Archivo>Abrir**.

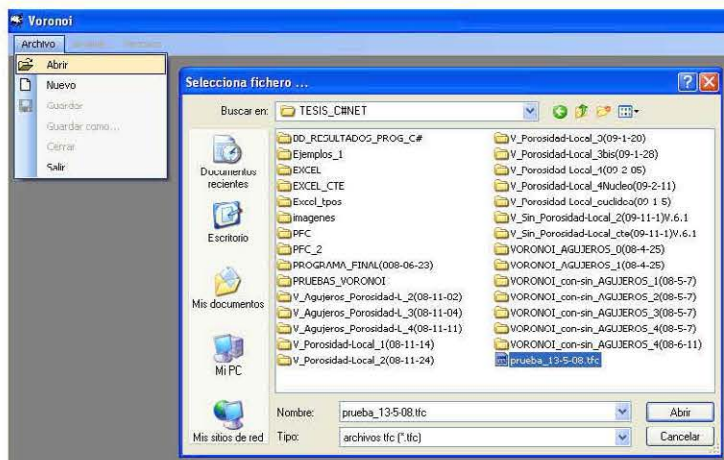


Figura 170. Menú para abrir un fichero con datos y resultados de zonificaciones generadas con la aplicación.

Una vez que la aplicación lee los datos, visualiza tantas ventanas de gráficos como zonificaciones haya almacenadas en el correspondiente fichero *.tfc*.

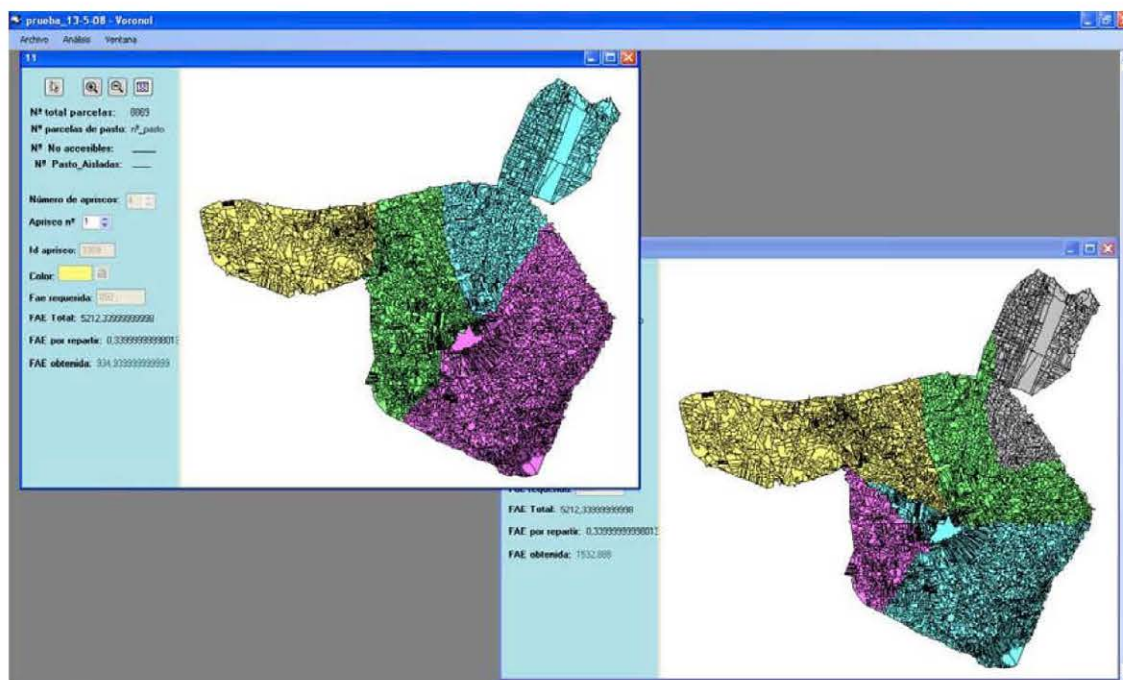


Figura 171. Visualización de las zonificaciones almacenadas en un fichero *.tfc, resultado de un proceso previo de análisis.



7.3 Apéndice 3: Glosario de abreviaturas

Las tablas siguientes recogen las abreviaturas y acrónimos, tanto en castellano como en inglés, que aparecen en el texto de los capítulos de esta tesis:

Abreviatura (inglés)	Significado
AAWVD	Adaptive Additively Weighted Voronoi Diagram
APLP	Aggregate Capacity Plant Location Problem
AZM	Automated Zone Matching Tool
AZP	Automatic Zoning Procedure
COM	Component Object Model
<i>CRS</i>	<i>Coordinate Reference System</i>
DLL	Dynamic Link Library
FAE	Forage Area Equivalent
GA	Genetic Algorithm
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
ILP	Integer Linear Programming
IP	Integer Programming
LACOPE	Landscape Development, Biodiversity and Co-operative Livestock Systems in Europe
LSEA	Local Search Evolutionary Algorithm
MIP	Mix Integer Programming
MLUA	Multi-site Land-Use Allocation
MOZART	Multi-Objective Zoning and AggRegation Tool
MST	Minimum Spanning Trees
NCGIA	National Center for Geographic Information and Analysis
OGC	Open Geospatial Consortium
SAGE	Spatial Analysis in a GIS Environment
SKATER	Spatial ‘K’luster Analysis by Tree Edge Removal
SPLP	Simple Plant Location Problem
TAZs	Transport Analysis Zones
UFLP	Uncapacitated Facility Location Problem
UML	Unified Modeling Language
WMS	Web Map Service
ZDES	Zone DEsign System



Abreviatura (castellano)	Significado
CF	Coefficiente Forrajero normalizado
UF	Unidad Forrajera normalizada
DGC	Dirección General de Catastro
DVE	Diagramas de Voronoi Estándar
DVG	Diagramas de Voronoi Generalizados
DVP	Diagramas de Voronoi con Peso
DVPA	Diagramas de Voronoi con Peso Aditivo
DVPAA	Diagrama de Voronoi con Peso Aditivo Adaptativo
DVPM	Diagrama de Voronoi con Peso Multiplicativo
DVPt	Diagrama de Voronoi de Potencia
E/R	Entidad/Relación
FEGA	Fondo Español de Garantía Agraria
IGN	Instituto Geográfico Nacional
ISO	Organización Internacional de Normalización
JCCM	Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha
MARM	Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino
O-O	Orientado a Objetos
OVC	Oficina Virtual de Catastro
PAC	Política Agraria Común
PPG	Problema de Partición de Grafos
<i>Problema de la clase NP</i>	Problema computacionalmente intratable o computacionalmente complejo
<i>Problema de la clase P</i>	Problema computacionalmente tratable
SAT	Superficie Agrícola Total
SD	Sin Denominación
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIGPAC	Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas